

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření místních ztrát – kompenzační smyčka,
změna průřezu

The Measurement of Local Losses – Compensating Pipe,
Sudden Contraction. Abrupt

Student: Petr Krč
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jana Rautová, Ph.D.

Ostrava 2009

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

plné jméno studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji závěrečnou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - využití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a využití školního díla a § 60 - školní dílo;
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo závěrečnou práci nevýdělečně užít ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci, budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO v případě zájmu její strany, uzavřu licenční smlouvu, s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby;

V Ostravě:

.....

plné jméno studenta

Adresa trvalého pobytu studenta:

Petr Krč

U Jeslí 433/1

Vratimov 739 32

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Krč, P. Měření místních ztrát – kompenzační smyčka, změna průřezu. Ostrava: Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, Fakulta strojní, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2009, 56 s. Bakalářská práce, vedoucí: Rautová, J.

Náplní bakalářské práce je měření místních ztrát pro kompenzační smyčku a změnu průřezu. Práce obsahuje části teoretickou a praktickou. V teoretické části je zpracována problematika energetických ztrát tekutiny na vybraných prvcích, postup měření těchto ztrát a zpracování vlastního návrhu měřicí tratě. V praktické části je provedeno vyhodnocení cechování clony a měření místních ztrát na zadaných prvcích.

ANNOTATION OF THESIS

Krč, P. The Measurement of Local Losses – Compensating Pipe, Sudden [Contraction](#). [Abrupt](#). Ostrava: Department of Hydrodynamics and Hydraulic Equipment, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB – Technical University of Ostrava, 2009, 56 p. bachelor's thesis, head: Rautová, J.

Content of this bachelor work is the measurement of local losses for the compensatory loop and the variation in the cross-section. Work contains both theoretical and practical part. In the theoretical part there is processed problematic of energetic losses of liquid on selected components, procedure of measurement of these losses and process of the own measuring way draft. In the practical part there are made the evaluation calibration of the parabolic nozzle and measurement of local losses of set components.

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Janě Rautové, Ph.D. za laskavou pomoc a cenné připomínky, podněty a rady při tvorbě této bakalářské práce.

Obsah bakalářské práce:

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ.....	1
ÚVOD.....	3
1. TEORIE ZTRÁT.....	4
1.1. TŘECÍ ZTRÁTY	4
1.2. MÍSTNÍ ZTRÁTY	6
1.3. ZTRÁTY CELKOVÉ	7
2. VYBRANÁ MÍSTA POTRUBNÍHO SYSTÉMU	7
2.1. ZMĚNA PRŮŘEZU	7
2.2. KOMPENZAČNÍ SMYČKA	13
3. MĚŘENÍ ZTRÁT.....	15
3.1. POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ	15
3.2. ZVOLENÍ ODBĚRNÉHO MÍSTA PRO MĚŘENÍ TLAKŮ	16
3.3. POSTUP MĚŘENÍ.....	16
3.4. VÝPOČET.....	17
3.5. GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ	19
3.6. TRATĚ PRO MĚŘENÍ TŘECÍCH A MÍSTNÍCH ZTRÁT	19
4. ZPRACOVÁNÍ VLASTNÍHO NÁVRHU MĚŘICÍ TRATĚ	21
4.1. OBECNÉ ZHODNOCENÍ	21
4.2. LABORATORNÍ ZAŘÍZENÍ KATEDRY	21
4.3. DALŠÍ ZPŮSOBY MĚŘENÍ.....	22
4.4. PRINCIPY UVEDENÝCH MĚŘIDEL.....	25
4.5. HYDRAULICKÉ SCHÉMA TRATĚ	27
5. CEJCHOVÁNÍ CLONY.....	29
5.1. ÚVOD	29
5.2. POSTUP.....	30
5.3. VYHODNOCENÍ.....	30

6. MĚŘENÍ A GRAFICKÉ VYHODNOCENÍ MÍSTNÍCH ZTRÁT.....	31
6.1. SKUTEČNÉ ZTRÁTY NA ZMĚNĚ PRŮŘEZU	31
6.2. VLIV ÚHLU POZVOLNÉ ZMĚNY PRŮŘEZU NA SOUČINITEL MÍSTNÍ ZTRÁTY.....	35
6.3. ZTRÁTY VÍŘENÍM NA KOMPENZAČNÍ SMYČCE.....	40
7. VYHODNOCENÍ CHYB MĚŘENÍ.....	44
8. ZÁVĚR.....	46
POUŽITÁ LITERATURA	47
SEZNAM PŘÍLOH:.....	48

Seznam použitého označení

Značka	Název	Jednotka
A	funkce průřezu	[1]
Q_V	objemový průtok	[m ³ .s ⁻¹]
R	poloměr	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[1]
Re_{krit}	Reynoldsovo číslo kritické	[1]
S	plocha průřezu potrubí	[m ²]
S_{2m}	průřez bez vířivých oblastí	[m ²]
X	měřená hodnota	[dle veličiny]
d	průměr potrubí	[m]
e_z	měrná ztrátová energie	[J.kg ⁻¹]
e_{zT}	měrná ztrátová energie třením	[J.kg ⁻¹]
e_{zV}	měrná ztrátová energie vířením	[J.kg ⁻¹]
e_{zC}	měrná ztrátová energie celková	[J.kg ⁻¹]
g	gravitační zrychlení	[m.s ⁻²]
h	výška hladiny	[m]
h_z	ztrátová výška	[m]
h_C	ztrátová výška na cloně	[m]
h_{zCV}	ztrátová výška celková vypočtená	[m]
h_{zD}	ztrátová výška difuzoru	[m]
h_{zT}	ztrátová výška na difuzoru třecí	[m]
h_{zP}	ztrátová výška na difuzoru změnou průřezu	[m]
h_{zR}	ztrátová výška na rozšíření	[m]
h_{zZ}	ztrátová výška na zúžení	[m]
k	absolutní drsnost stěny potrubí	[m]
l	délka potrubí	[m]
l_e	délka potrubí ekvivalentní	[m]

p	tlak	[Pa]
p_z	ztrátový tlak	[Pa]
p_{zt}	ztrátový tlak třením	[Pa]
p_{zv}	ztrátový tlak vířením	[Pa]
r	poloměr	[m]
t	teplota	[°C]
v	rychlost proudění	[m.s ⁻¹]
x_R	největší hodnota měřicího rozsahu	[dle veličiny]
α	úhel kuželovitosti	[rad]
α_l	teplotní součinitel délkové roztažnosti tuhé látky	[K ⁻¹]
β	součinitel kontrakce	[1]
Δ	rozdíl; absolutní chyba	[dle veličiny]
Δ_m	mezní absolutní chyba	[dle veličiny]
δ_M	relativní chyba přístroje	[%]
δ_{TP}	třída přesnosti	[%]
ε	relativní drsnost stěny	[1]
ζ	ztrátový součinitel	[1]
ζ_c	ztrátový součinitel celkový	[1]
λ	třecí součinitel	[1]
λ_s	třecí součinitel střední	[1]
ν	kinematická viskozita	[m ² .s ⁻¹]
ρ	měrná hmotnost	[kg.m ³]

Úvod

V každém prvku a v každém úseku potrubního systému vykazuje proudící tekutina určitou energetickou ztrátu. Energetické ztráty se projevují poklesem tlaku nebo ztrátovou výškou. V souladu se zákonem zachování energie však tato energie nemizí, ale mění se na energii tepelnou, která způsobuje zahřívání média (adiabatická změna) nebo je odváděná stěnami potrubí do okolí (polytropická změna). Protože se jedná o nevratný proces přeměny energie, a proto nežádoucí, hovoříme o ní jako o energii ztrátové. Měřením můžeme tuto ztrátu na daném prvku nebo úseku zjistit a získat představu o jejím průběhu pro daný průtok. K měření tlakových ztrát nám slouží experimentální tratě, jež mohou být vyrobeny s předdefinovanými měřenými prvky např. pro školní účely pro ujasnění a osvojení problematiky nebo se sestavovat s vybraných částí dle potřeby například výrobcem potrubních prvků. Tlakové ztráty lze měřit samozřejmě i přímo na konkrétním prvku v provozu. Důvodů proč je nutné znát tyto ztráty na potrubních prvcích či úsecích v rozvodu je v praxi mnoho, například:

- Při projektování hydraulických prvků, kdy je nutno navrhnout takový hydraulický systém, aby se minimum tlakové energie přeměnilo na energii tepelnou a byla docílena dobrá energetická bilance.
- Při navrhování potrubních rozvodů, kdy je nutno zajistit dodávku tekutiny od zdroje až na požadované místo jen za nezbytného tlakového úbytku.
- Při návrhu čerpadla z hlediska dovoleného kavitačního součinitele při dané sací výšce a složitosti sacího vedení potrubí.
- Při návrhu čerpacího potrubního systému, kdy je nutno docílit vhodnou charakteristiku potrubí.
- Při navrhování odběrného potrubí z hlavního plynovodu k sání kompresoru, kdy je nutné, aby při provozu na sání nevznikal podtlak, při němž by mohlo docházet k nasávání okolního vzduchu do plynu a tím ke zhoršení jeho koncentrace např. přes ucpávky a podobně.

1. Teorie ztrát

Pokud by v potrubí proudila ideální (neviskózní) tekutina o tlaku p a rychlosti v , tak by byla zachována konstantní celková energie v kterémkoliv místě po celé jeho délce dle Bernoulliho rovnice:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 = konst. \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (1.1)$$

$\frac{p}{\rho}$	měrná tlaková energie	$[\text{J.kg}^{-1}]$
------------------	-----------------------	----------------------

$\frac{v^2}{2}$	měrná kinetická energie	$[\text{J.kg}^{-1}]$
-----------------	-------------------------	----------------------

$g \cdot h$	měrná potenciální energie	$[\text{J.kg}^{-1}]$
-------------	---------------------------	----------------------

Protože ideální tekutina neexistuje, každá tekutina vykazuje jistou míru vnitřního tření, tak proudění skutečné tekutiny provází energetické ztráty. Pro skutečnou kapalinu tedy platí:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + e_z \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (1.2)$$

Ztrátu energie při proudění skutečné kapaliny způsobují síly, které působí proti pohybu částic tekutiny. Ztrátovou energii je možno vyjádřit tlakovou energií, potenciální energií nebo kinetickou energií dle vztahu:

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (1.3)$$

Hydraulické ztráty mohou být dvojího typu a to třecí ztráty a místní ztráty nebo kombinace těchto dvou.

1.1. Třecí ztráty

Třecí ztráty způsobuje drsnost vnitřní stěny potrubí vzhledem k viskozitě tekutiny jež potrubím proudí. Tekutina je u stěny brzděná tečným napětím. U laminárního proudění je ve středu průřezu rychlost proudění nejvyšší, s přibližováním ke stěně potrubí se rychlost snižuje. U turbulentního proudění je následkem chaotického pohybu tekutiny tečné napětí větší, proto i ztráty jsou větší, ale rychlost proudění se od středu ke stěně se mění

nepravidelně. Velikost třecí ztráty je závislá na vnitřní drsnosti potrubí, kinematické viskozitě tekutiny, rychlosti proudění a délce potrubí. Ztrátová energie je dána vztahem:

$$e_z = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (1.4)$$

Součinitel tření je závislý na Re-čísle a drsnosti stěny potrubí:

$$\lambda = f(\text{Re}, \varepsilon) \quad [1] \quad (1.5)$$

Re-číslo se vypočítá:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad [1] \quad (1.6)$$

Relativní drsnost stěny ε je definována:

$$\varepsilon = \frac{k}{d} \quad [1] \quad (1.7)$$

Rovnice pro třecí součinitel se dá odvodit analyticky jen u laminárního proudění ($\text{Re} < \text{Re}_{\text{krit}} = 2320$) z rovnice pro střední rychlost, kde po úpravě dostaneme:

pro kruhové průřezy:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad [1] \quad (1.8)$$

pro nekruhové průřezy:

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}} \quad [1] \quad (1.9)$$

Pro turbulentní proudění ($\text{Re} > 2320$) se hodnota λ nedá řešit analyticky a stanovuje se experimentálně. Byla stanovena celá řada vzorců pro hydraulicky hladká i hydraulicky drsná potrubí i pro různé rozsahy Re-čísla. Např. pro hydraulicky hladká potrubí nejčastěji používaný vztah dle Blasia:

$$\lambda = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25} \text{ pro } \text{Re} < 8 \cdot 10^4 \quad [1] \quad (1.10)$$

nebo Drewa:

$$\lambda = 0,0056 + 0,5 \cdot \text{Re}^{-0,32} \text{ pro } \text{Re} < 10^6 \quad [1] \quad (1.11)$$

Z exponenciální funkce je zřejmé, že při vysokých Re-číslích se třecí součinitel λ dostává do konstantních hodnot.

1.2. Místní ztráty

Místní ztráty způsobují v potrubním systému prvky, které narušují proudění tekutiny změnou geometrie daného místa, tedy změnou průřezu nebo směrem toku. Mezi takové prvky patří například clona, armatura, výtokové místo, průtok chladičem, koleno nebo právě změna průřezu či kompenzační smyčka. V těchto částech potrubí dochází ke změně rychlosti i směru proudění a dochází ke vzniku víření či odtrhávání proudů toků. Právě tyto nepříznivé děje jsou spojené se ztrátou energie. Ta se udává vztahem:

$$e_z = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (1.12)$$

Ztrátový součinitel ζ závisí na druhu místní ztráty, drsnosti stěn, konstrukčních parametrech, tvaru rychlostního profilu a na režimu proudění. Dříve složitost jevu a různorodost tvarů konstrukce prvků umožňovala teoretické stanovení ztrátového součinitele jen u jednoduchých případů, dnes je již uskutečnitelné v modelovacích programech jako například Fluent nebo CFX-10 vypočítat popis proudění kapaliny. Určování ztrátového součinitele matematickým modelováním se provádí spíše v průběhu návrhu potrubního prvku, jinak se ztrátový součinitel stanovuje experimentálně a platí jen ve stejných nebo fyzikálně podobných případech, za jakých byl změřen. Vliv Re-čísla se projevuje obdobně jako u třecích odporů především při malých hodnotách Re-čísla. Při velkých Re-číslích je ztrátový součinitel odporu konstantní. V případě změny průřezu může být vyjádřen v závislosti na přítokové, nebo odtokové rychlosti:

$$\zeta_1 \cdot \frac{v_1^2}{2} = \zeta_2 \cdot \frac{v_2^2}{2} \quad [1] \quad (1.13)$$

A protože dle rovnice kontinuity platí že:

$$S \cdot v = \text{konst.} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.14)$$

Tak pro kruhové průřezy platí:

$$\zeta_1 = \zeta_2 \cdot \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \quad [1] \quad (1.15)$$

1.3. Ztráty celkové

Pokud jsou v potrubním celku potrubí s daným třecím součinitelem i prvky vykazující místní ztrátu, tak dle rovnic 1.3 a 1.4 se dá odvodit celková energetická ztráta:

$$e_{zc} = \frac{v^2}{2} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta_i \right) \quad [\text{J.kg}^{-1}] \quad (1.16)$$

Místní ztráty lze převést na ztráty třením pomocí ekvivalentní délky :

$$l_e = \frac{\zeta \cdot d}{\lambda} \quad [m] \quad (1.17)$$

A poté spočítat celkový součinitel ζ_c místní ztráty ze vztahu:

$$\zeta_c = \lambda \cdot \frac{l}{d} + \sum \zeta = \lambda \frac{l}{d} + \lambda \frac{\sum l_e}{d} = \frac{\lambda}{d} (l + \sum l_e) \quad [1] \quad (1.18)$$

2. Vybraná místa potrubního systému

2.1. Změna průřezu

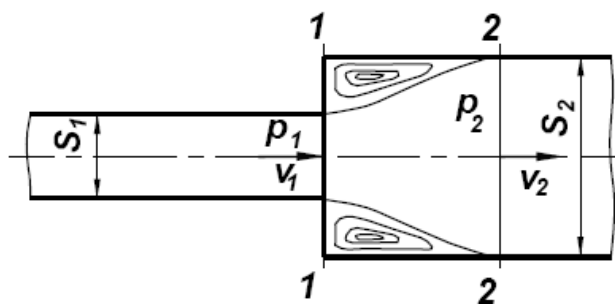
Změna velikosti průřezu potrubí může být buď náhlá, nebo pozvolná. Náhlá je taková, kdy se na potrubí změni velikost plochy průřezu 1 na průřez 2 na jednom místě délky potrubí, a to buď s odchylkou jeho osy, nebo bez její změny. Náhlá změna průřezu může být podle smyslu proudění tekutiny konstruována buď jako náhlé zúžení nebo jako náhlé rozšíření.

Pozvolná změna velikosti průřezu je taková, kdy se změna velikosti průřezu neděje na jednom místě, ale na určitém úseku postupně. Taktéž může být při změně zachována osa potrubí nebo se může změnit. Pozvolnému zúžení se říká konfuzor a pozvolnému rozšíření se říká difuzor.

Při průtoku skutečné tekutiny potrubím se změnou průtočných průřezů dochází ke změně rychlosti v daném místě, což je spojeno s rozptylem energie. [1]

2.1.1. Ztráta náhlým rozšířením průřezu

Při náhlém rozšíření průřezu je ztráta způsobená víry v oblasti mezi odtrženou proudnicí a stěnami (obr. 2.1).



Obr. 2.1 Změna náhlým rozšířením [2]

Na určité délce rozšířeného potrubí se proud kapaliny rozšíří znovu po celém průřezu. Ze změny hybnosti kapaliny byl matematicky odvozen tzv. Bordův vzorec pro výpočet ztrátového součinitele náhlého rozšíření pro průtokovou rychlost v_1 (označen ζ_1) a odtokovou rychlost v_2 (označen ζ_2).

$$\zeta_1 = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad [1] \quad (2.1)$$

$$\zeta_2 = \left(\frac{S_2}{S_1} - 1\right)^2 \quad [1] \quad (2.2)$$

Při velkém poměru průřezu S_2 / S_1 je ztráta větší než vypočtená hodnota, neboť například vtéká-li kapalina rychlostí v_1 z potrubí do velké nádrže, v níž je rychlost v_2 zanedbatelná, rozptýlí se celá kinetická energie kapaliny. [1]

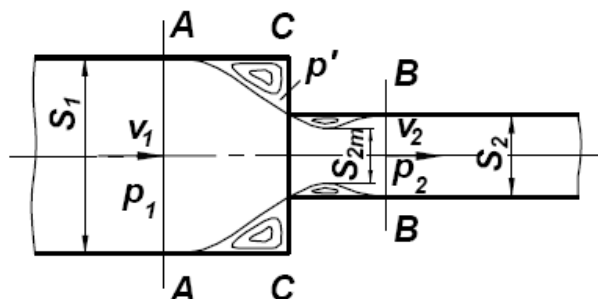
Empiricky zjištěná závislost ζ_1 na Re-čísle a poměru průřezu náhlého rozšíření dle literatury [5] je v tabulce 1.

S_1/S_2	Re						
	10	10^2	2×10^2	10^3	2×10^3	3×10^3	$\geq 4 \times 10^3$
0,1	3,10	1,70	1,65	2,00	1,60	1,00	0,81
0,2	3,10	1,40	1,30	1,60	1,25	0,70	0,64
0,3	3,10	1,20	1,10	1,30	0,95	0,60	0,50
0,4	3,10	1,10	1,00	1,05	0,80	0,40	0,36
0,5	3,10	0,90	0,75	0,90	0,65	0,30	0,25
0,6	3,10	0,80	0,60	0,60	0,50	0,20	0,16

Tab. 1 Závislost ζ_1 na Re-čísle a poměru průřezu náhlého rozšíření [5]

2.1.2. Ztráta náhlým zúžením průřezu

Při náhlém zúžení dochází ke ztrátě v obou částech průřezů. Proud kapaliny nemůže následkem setrvačnosti sledovat tvar stěn potrubí, a proto se odtrhne a vzniknou vířivé oblasti (obr. 2.2).



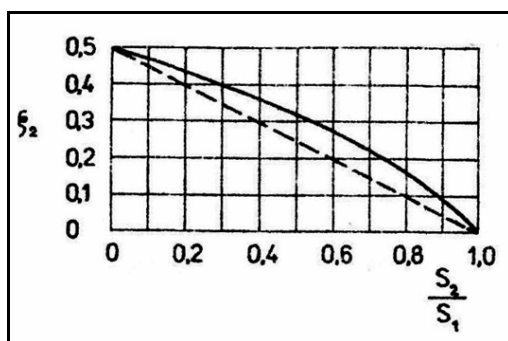
Obr. 2.2 Ztráta náhlým zúžením [2]

Podobný případ nastává při vtoku z nádrže do potrubí. Ztrátový součinitel v praxi závisí též na provedení vstupu hrany potrubí. Matematické řešení opět vychází ze změny hybnosti kapaliny a je stanoveno pro průtokovou rychlost v_1 (označen ζ_1) a odtokovou rychlost v_2 (označen ζ_2). [1]

$$\zeta_1 = \left(\frac{S_1}{S_2} - 1 \right) \cdot \frac{S_1}{S_2} \quad [1] \quad (2.3)$$

$$\zeta_2 = 1 - \frac{S_2}{S_1} \quad [1] \quad (2.4)$$

Podle experimentálních výsledků je závislost ztrátového součinitele ζ_2 při náhlém zúžení dána plně vytaženou křivkou (obr 2.3).



Obr. 2.3 Závislost ζ_2 na S_2 / S_1 [1]

Tomuto průběhu odpovídá přibližně lineární závislost (čárkovaná čára) dána vztahem:

$$\zeta_2 = 0,5 \cdot \left(1 - \frac{S_2}{S_1}\right) \quad [1] \quad (2.5)$$

Pro vtok do potrubí (z nádrže $S_1 \rightarrow \infty$) je $\zeta_2 = 0,5$, zatím co dle 2.4 je $\zeta_2 = 1$. Na tomto případě je patrné, že složitost vírových oblastí není teoretickým výpočtem správně popsána. V zúženém průřezu S_2 dochází v potrubí k zúžení proudu kapaliny. Součinitel kontrakce proudu

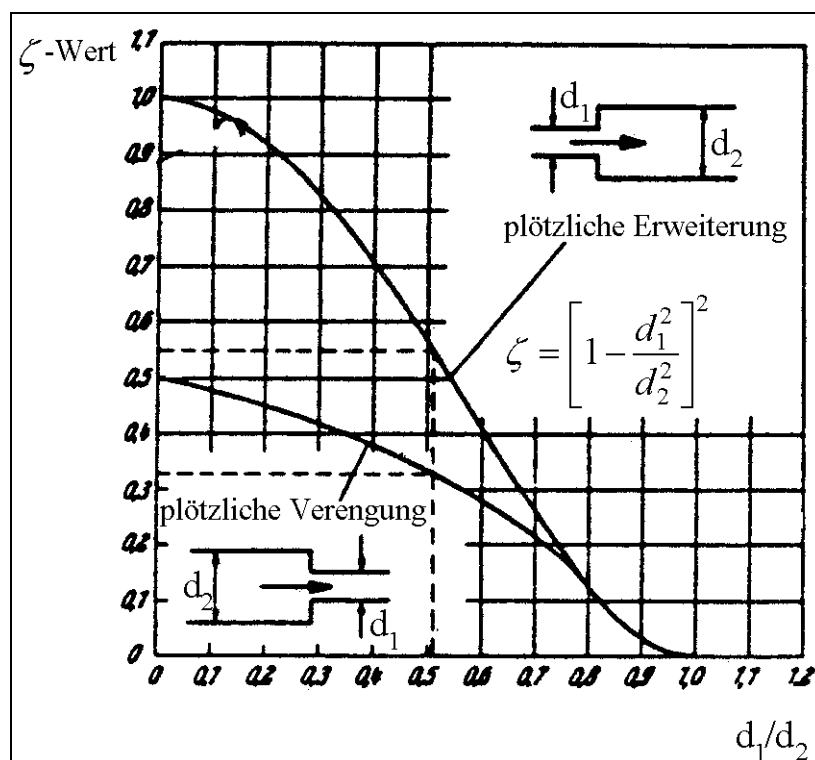
$$\beta = \frac{S_{2m}}{S_2} \quad [1] \quad (2.6)$$

je podle výsledků měření určen empirickým vztahem:

$$\beta = (0,45 \text{ až } 0,55) \cdot \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2 \quad [1] \quad (2.7)$$

V zúženém průřezu S_2 je maximální rychlost kapaliny a minimální tlak, který nesmí klesnout pod tlak nasycených par kapaliny pro danou teplotu, aby se nenarušilo proudění kavitací. [1]

Porovnání ztrátového součinitele ζ_1 pro náhlé zúžení a náhlé rozšíření vztaženého k rychlosti v_1 v závislosti na poměru d_1/d_2 je zobrazeno na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Závislost ζ_1 na d_1/d_2 [5]

2.1.3. Složené potrubí s proměnným průřezem

Máme-li potrubí s proměnnými průřezy, platí

$$h_Z = \sum_{k=0}^n \left[\left(\sum \zeta_k + \lambda_k \cdot \frac{l_k}{d_k} \right) \cdot \frac{v_k^2}{2 \cdot g} \right] \quad [\text{m}] \quad [2.8]$$

Po určení neznámých rychlostí jako funkce výtokové rychlosti dle rovnice kontinuity můžeme vytvořit vztah pro celkový ztrátový součinitel vztažený k výtokové rychlosti:

$$\zeta_C = \sum_{k=0}^n \left[\left(\sum \zeta_k + \lambda_k \cdot \frac{l_k}{d_k} \right) \left(\frac{d_0}{d_k} \right)^4 \right] \quad [1] \quad [2.9]$$

2.1.4. Ztráta na pozvolném přechodu průřezu

Při ztrátě náhlým rozšířením bylo dokázáno, že dochází ke značným ztrátám způsobeným odtržením proudu a vířením. Ztráty mohou být podstatně zmenšeny, jestliže přechod z menšího průřezu na větší bude pozvolný, jak je tomu u difuzoru. Difuzor se používá hlavně tam, kde je třeba přeměnit kinetickou energii proudu na tlakovou (u podzvukových rychlostí) s nejmenšími ztrátami. Je známo, že velmi malým rozšířením průřezu se znatelně mění proudění, a to zejména rychlostní profil, který je tím více protažen ve směru proudění, čím je úhel rozšíření větší. [2]

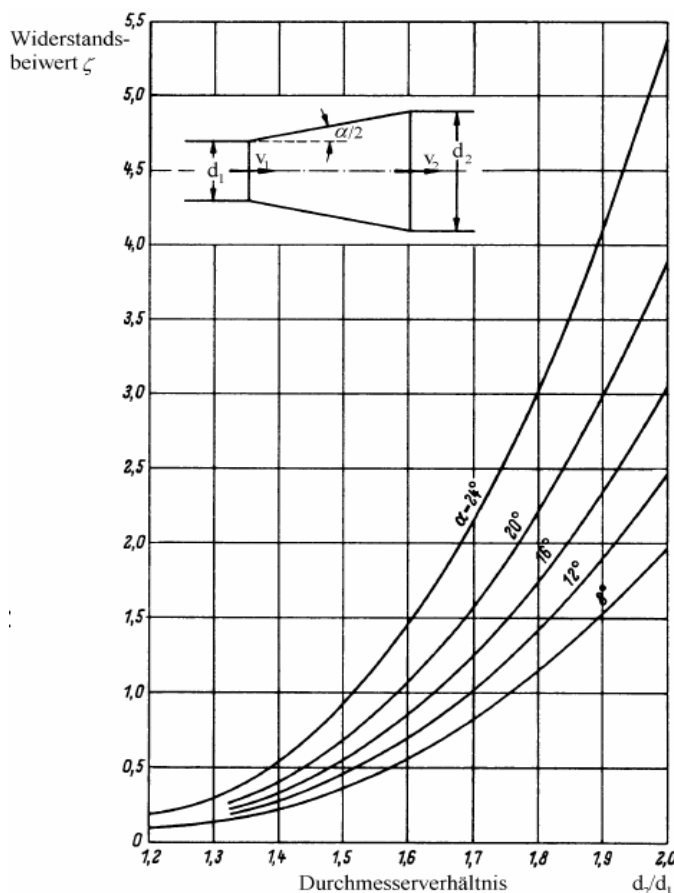
Do úhlu rozšíření $\alpha = 6^\circ$ až 8° zůstává protažený rychlostní profil symetrický k ose difuzoru. Při dalším zvětšení úhlu se proud odrhne od stěny a symetrie proudu se poruší. Příčiny odtržení záleží v mezní vrstvě na stěně difuzoru, kde rychlost částic kapaliny se zmenšuje až na nulu. Při rozšíření průřezu dochází ke zvýšení statického tlaku v souladu s Bernoulliho rovnicí, neboť se střední rychlosti zmenšují. Statický tlak se mění v celém průřezu. Rychlost kapaliny klesá ve směru proudu a na jistém místě dochází k tomu, že kinetická energie částic u stěny je tak malá, že nestačí překonat statický tlak, který vzrůstá ve směru proudu. Účinkem tohoto tlakového gradientu se proud kapaliny odtrhne od stěny. [2]

Při úhlech $\alpha = 10^\circ$ až 50° nastává odtržení proudu zpravidla od jedné stěny, na níž je rychlost menší. Proto nemůže dojít k odtržení proudu na protější stěně. Rychlostní profil se stane nesymetrickým. Nesouměrnost proudu je často doprovázena nestabilním odtrháváním, což vyvolá kmitání proudu (pulsace) a tvoření vírů. [2]

V difuzorech s většími úhly rozšíření než 50° až 60° nemůže proud sledovat stěny difuzoru a odtrhává se po celém průřezu. Odtrhávání od stěny je doprovázeno menšími pulsacemi proudu. V rozšiřující se troubě nebo kanále vzrůstá smykové napětí následkem zvýšení turbulence, což způsobuje zvýšení ztrát. Rovněž pulsace přispívají ke zvýšení ztrát. Nastává-li odtržení proudu v difuzoru, jsou ztráty způsobeny převážně víry. Všechny ztráty mohou doprovázet ztrátu třením v difuzoru. Celkové ztráty v difuzoru je možno rozepsat na ztrátu třením a ztrátu spojenou se změnou průřezu pomocí ztrátové výšky:

$$h_{zD} = h_{zT} + h_{zP} \quad [\text{m}] \quad (2.10)$$

Empiricky zjištěný průběh závislosti ζ_2 na poměru d_2/d_1 dle literatury [5] je pro různé úhly α znázorněn na obrázku 2.5.



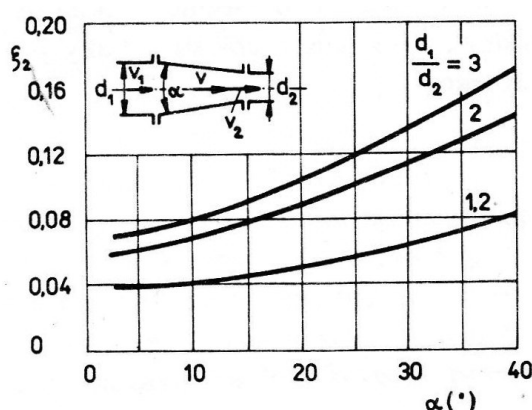
Obr. 2.5 Difuzor - závislost ζ_2 na poměru d_2/d_1 pro různé úhly α [5]

Zvláštním případem je difuzor, jehož průřez se zvětšuje pozvolna, tj. vrcholový úhel je v rozmezí, při němž se proud kapaliny neodtrhne. Hydraulická ztráta v takovém difuzoru je v podstatě ztrátou třením v kuželovém potrubí. Při opačném průtoku, to je při zužování

průřezu (konfuzor), je hydraulická ztráta způsobena rovněž třením a matematicky ji lze určit integrací na elementární délce kuželového potrubí. Matematické řešení pro ztrátový součinitel ζ_2 :

$$\zeta_2 = \frac{\lambda_s}{8tg \frac{\alpha}{2}} \left[1 - \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^4 \right] \quad [1] \quad (2.11)$$

Empiricky zjištěná závislost ζ_2 na úhlu α konfuzoru pro různé poměry d_1/d_2 je zobrazena na obrázku 2.6.



Obr. 2.6 Konfuzor - závislost ζ_2 na úhlu α pro různé poměry d_1/d_2 [1]

2.2. Kompenzační smyčka

2.2.1. Účel

Každý materiál, ze kterého je potrubí vyrobeno, má jistou teplotní délkovou roztažnost. Potrubí musí být namontováno vždy a všude tak, aby mohlo tepelně dilatovat. Nejsou-li teplotní délkové změny vhodným způsobem kompenzovány, tj. pokud potrubí není umožňováno měnit svoji délku, vznikají ve stěnách trubek přídatná tahová a tlaková napětí, která výrazně zkracují životnost potrubí a může dojít zejména u zkracování potrubí až k destrukci systému. Délková změna Δl se vypočte:

$$\Delta l = \alpha_l \cdot l \cdot \Delta t \quad [m] \quad [m] \quad (2.12)$$

$\alpha_l = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pro uhlíkovou ocel, $\alpha_l = 1 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ pro polypropylen. [7]



Obr. 2.7 Kompenzační smyčka [28]

Kompenzační smyčky je možno použít pro kompenzaci dilatací potrubí do $d = 40 \text{ mm}$. Z technických důvodů se smyčky větších dimenzí nevyrábějí a také jejich dilatační schopnost by byla malá. Jejich výhodou například oproti U-kompenzátorům je skutečnost, že nemají tak velký rozměr a nezabírají tak velký prostor. [10]

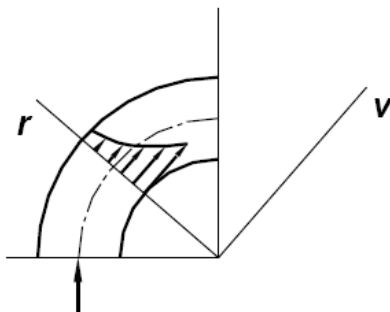
2.2.2. Ztráty

Kompenzační smyčka to jsou teoreticky čtyři potrubní kolena (o stejném poloměru, světlosti a úhlu připojovacích os) řazená do sebe ve stejném sledu, rozdíl je pouze v celkovém vyosení z důvodů připojení smyčky k potrubí na vstup a výstup.

Pokud by proudila ideální kapalina v zakřiveném potrubí, měl by rychlostní profil dle zákona o potenciálním víru

$$v \cdot r = \text{konst.} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.13)$$

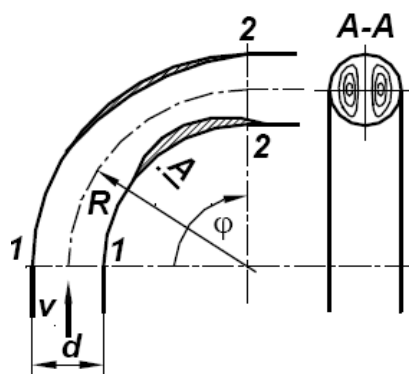
hyperbolické rozložení (obr.2.8).



Obr. 2. Rozložení rychlosti v kolenu [1]

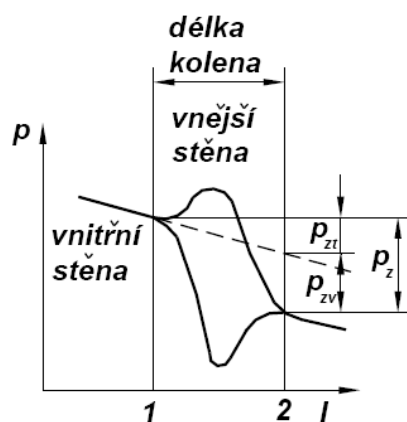
U skutečné tekutiny však budou pomalejší částice brzdit rychlejší, a přemísťovat se na větší nebo menší poloměr. Vzniká složitý (spirálovitý) prostorový pohyb. Součástí tohoto

proudění je vířivé proudění v příčném řezu, charakteristické dvěma víry opačného smyslu. Proud na vnitřní hraně kanálu se nemůže odtrhnout, takže vznikají víry i u stěn (obr 2.9).



Obr. 2.9 Rozložení víření v kolenu [1]

Průběh tlaku na vnitřní a vnější stěně kolena je vyznačen na obr. 2.10. Čárkovaná přímka znázorňuje průběh tlaku v přímém potrubí. V diagramu je vyznačena tlaková ztráta p_z a její složky odpovídající třecím ztrátám p_{zt} a ztrátám vířením p_{zv} . [1]



Obr. 2.10 Průběh tlaků při proudění v kolenu [1]

3. Měření ztrát

3.1. Popis měřícího zařízení

Při zjišťování tlakové ztráty je nutné mít zdroj tlakové energie pro tekutinu. Dále je nutné mít k dispozici měření tlaku před a za měřeným prvkem nebo částí potrubí a možnost

měřit průtočné množství nebo rychlost proudění tímto místem. Je potřeba znát teplotu tekutiny pro stanovení kinematické viskozity a hustoty. Dále pak vnitřní průměr potrubí a jeho délku. Při sestavování závislostí spojených se změnou průtoků, je nutná možnost regulace průtočného množství tekutiny měřeným prvkem regulační armaturou.

3.2. Zvolení odběrného místa pro měření tlaků

Důležité je správné zvolení odběrového místa pro měření statického tlaku. Odběr se dělá v místě ustáleného proudění. Vyloučí se tak zkreslení měření způsobené vířením. Pokud by bylo měření od daného prvku nebo úseku příliš vzdáleno, pak by byly naměřené ztráty vyšší o třetí ztráty na potrubí. Při kruhových průřezích a měření kapaliny by neměly být odběry umístěny v nejvyšším a nejnižším místě průřezu. Zamezí se tak úniku vzduchových bublin a ucpání usazeninami. Obvykle se volí boční odběr. V místě odběru musí být stěny potrubí rovnoběžné se směrem proudění a osa odběru tlaku musí být kolmá na stěnu potrubí. Další nedostatky mohou být velký průměr odběru d (volí se $d = 3 \div 5 \text{ mm}$), otřepy nebo velké stažení hrany R (volí se $R \leq 0,25d$). V těchto případech by se snímala i část dynamického tlaku. Délka odběru l o průměru d se volí $l \geq 2d$. [4]

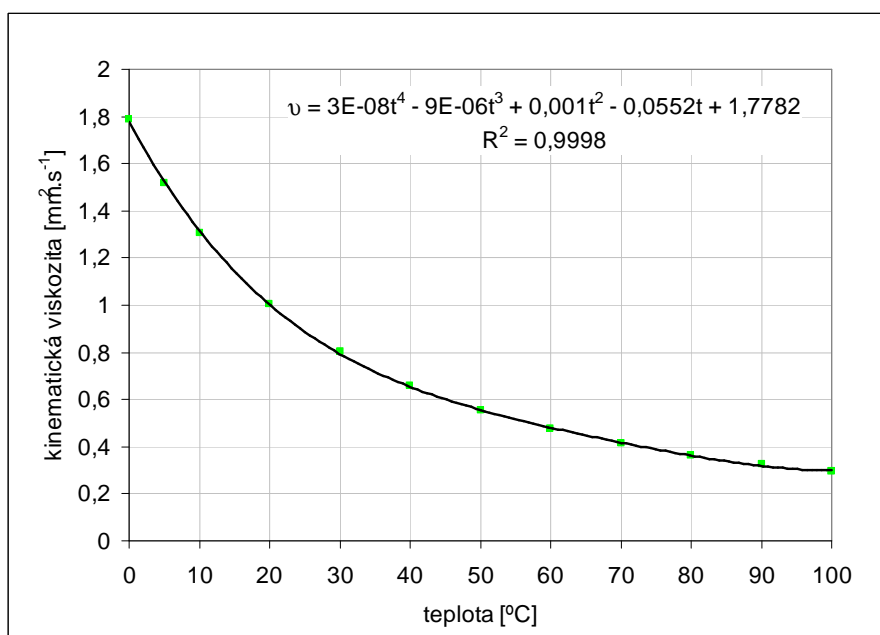
3.3. Postup měření

Začíná se spuštěním zdroje tlakové energie. Při otevřené regulační armatuře se nechá ustálit proudění média měřeným prvkem nebo úsekem. Po ustálení proudění je nutné v případě měření kapaliny dokonale odvzdušnit přípojku k manometru. Poté se odečtou hodnoty tlaků nebo jejich rozdíl, v případě měření skleněnými trubicemi se odečtou rozdíly hydrostatických hladin. Dále se odečte hodnota průtoku, rychlosti proudění nebo diferenční tlaky či rozdíly hydrostatických hladin na cloně a vše se zapíše do tabulky. Pokračuje se přivřením regulační armatury o určitou úroveň a po ustálení se opět odečtou a zapíší hodnoty. Takto se pokračuje až do minimálního přivření.

3.4. Výpočet

- Pokud se neměří přímo tlaková difference, tak se z naměřených hodnot tlaků před a za měřeným prvkem nebo úsekem vypočtou tlakové rozdíly.
- Dle teploty tekutiny se stanoví kinematická viskozita. V případě vody se odečte z grafu (obr. 3.1) nebo výpočtem:

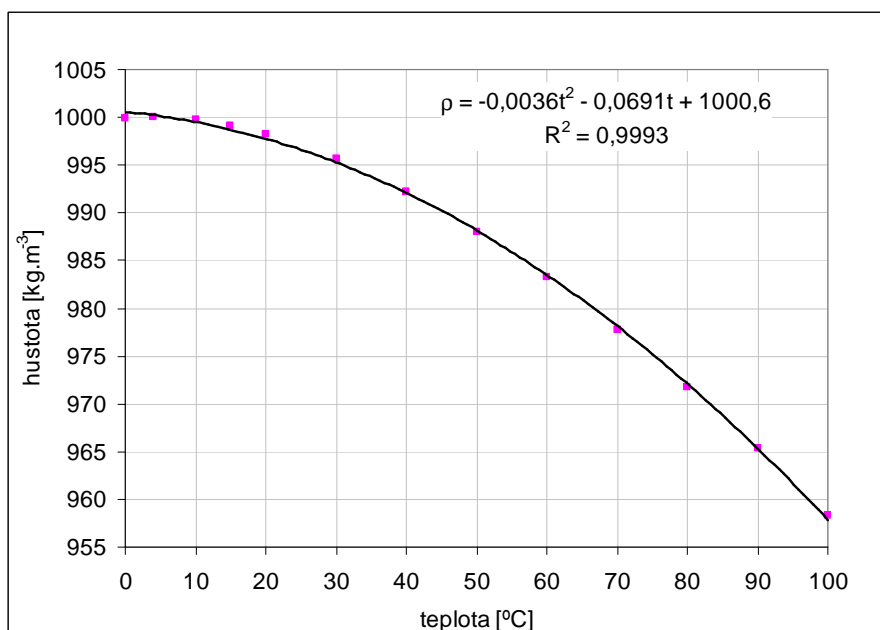
$$\nu = 3 \cdot 10^{-8} t^4 - 9 \cdot 10^{-6} t^3 + 0,001 t^2 - 0,0552 t + 1,7782 \quad [\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad [3.1]$$



Obr. 3.1 Kinematická viskozita vody v závislosti na teplotě [8]

- Dle teploty média se stanoví hustota. V případě vody se odečte z grafu (obr. 3.2) nebo výpočtem:

$$\rho = -0,0036 t^2 - 0,0728 t + 1000,7 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}] \quad [3.2]$$



Obr. 3.2 Hustota vody v závislosti na teplotě [9]

- Vypočítá se rychlost proudění pro jednotlivé profily proudění v každé poloze armatury ze vzorce:

$$v = \frac{Q_v}{S} \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (3.3)$$

kde u kruhových profilů je

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad [\text{m}^2] \quad (3.4)$$

- Pokud jsou k dispozici diferenční tlaky na cloně, použije se pro zjištění množství průtoku odečet z cejchovní křivky nebo přepočít pomocí funkční závislosti.
- U místních ztrát se uvádí ztrátový součinitel ζ a vyjadřuje se jeho závislost na Re-čísle. Vypočtou se proto tyto hodnoty pro jednotlivé průtoky. Ztrátový součinitel, při stejných velikostech průřezů, se vypočte odvozením z rovnice 1.3 :

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{v^2 \cdot \rho} \quad [-] \quad (3.5)$$

- Při odlišných velikostech průřezů se stanovuje ζ buď k přítokové nebo odtokové rychlosti, ale nejprve je nutno z rovnice 1.2 odvodit e_z :

$$e_z = \frac{p_1 - p_2}{\rho} + g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (3.6)$$

- Poté lze vypočítat ztrátový součinitel ζ odvozením ze vztahu 1.3 buď k rychlosti v_1 nebo v_2 :

$$\zeta = \frac{2 \cdot e_z}{v^2} \quad [-] \quad (3.7)$$

- U ztrát třením se uvádí třecí součinitel λ , vyjadřuje se také jeho závislost na Re-čísle. Odvozením z 1.4 vypočteme:

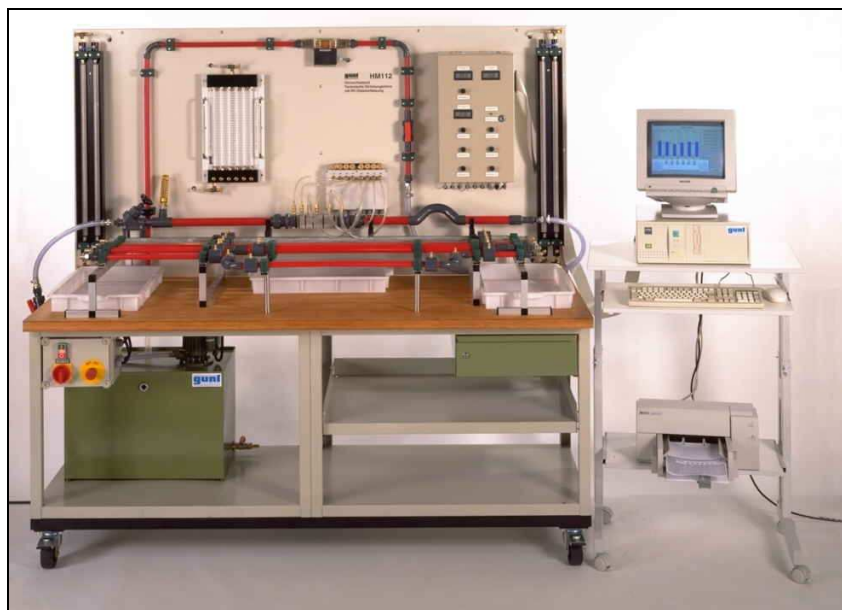
$$\lambda = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot d}{v^2 \cdot \rho \cdot l} \quad [-] \quad (3.8)$$

3.5. Grafické zpracování

Nyní je k dispozici několik hodnot při různých průtocích, a je možno přistoupit ke grafickému zpracování či funkční závislosti například v programu Excel pomocí regresní funkce. Vždy se vychází z toho co je potřeba zjistit. Sestavuje se například závislost ztrátového tlaku nebo ztrátové hladiny na průtoku či ztrátových součinitelů na Re-čísle a podobně.

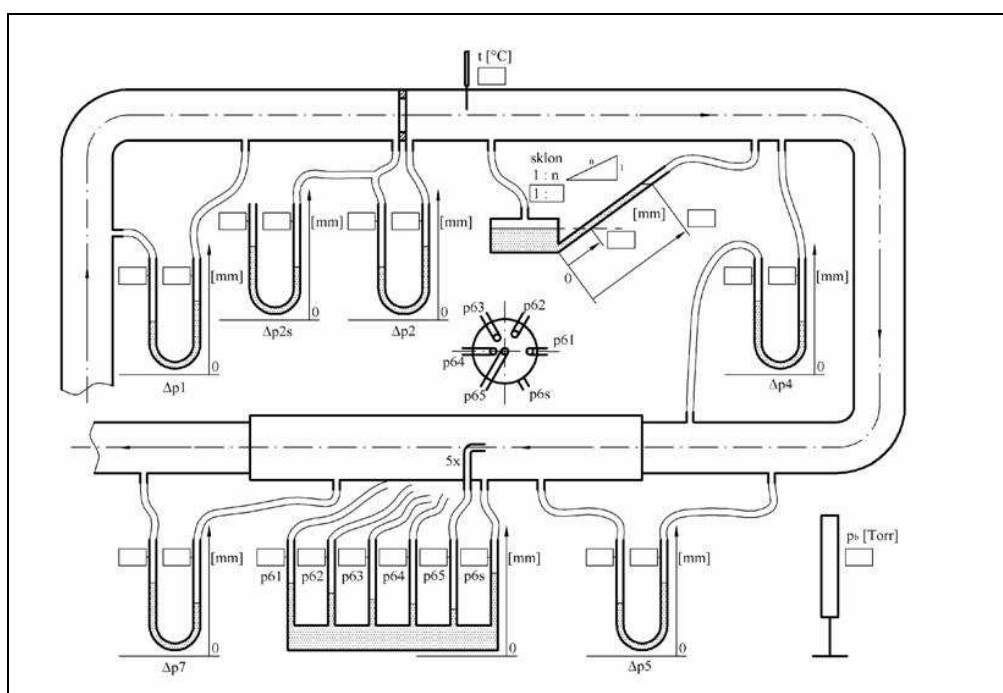
3.6. Tratě pro měření třecích a místních ztrát

Experimentální tratě pro určování třecích a místních ztrát mohou být kapalinové (voda, olej) nebo vzduchové. Kapalinové sériově vyrábí několik výrobců, např. firma GUNT Hamburk vyrábí 3 typy, pod označením TK 112, TK 122 a TK 150. Přičemž typ TK 112 je dodáván i se softwarem (obr. 3.3). Firma nabízí k těmto typům i velké množství doplňků a panelů s různými prvky či možnost vlastního nadefinování trati. Další výrobci tohoto sortimentu jsou například firmy TecQuipment, Solution nebo Armfield.



Obr. 3.3 Experimentální trať - TK 112 (GUNT Hamburk) [21]

Dále se tratě sestavují dle potřeby individuálně. Vzduchovou trať má sestavenou například ČVUT Praha (obr. 3.4) Lze na ní měřit ztrátový součinitel kolene, objemový tok měřený clonkou, součinitel třecích ztrát, ztrátový součinitel dvou kolen, ztrátový součinitel náhlého rozšíření, určení objemového toku z rychlostního profilu, ztrátový součinitel náhlého zúžení. Jako tlakoměry na této trati jsou k dispozici U-trubice, bateriový manometr a sklonný lihový manometr.



Obr. 3.4 Schéma vzduchové trasy pro měření třecích a místních ztrát na ČVUT Praha

4. Zpracování vlastního návrhu měřící tratě

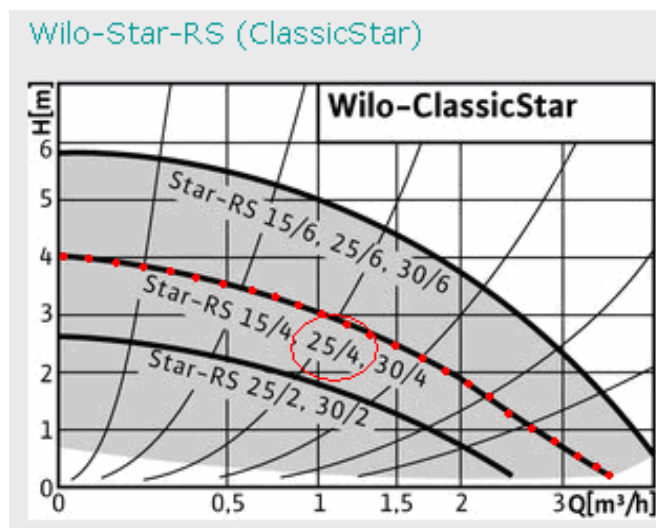
4.1. Obecné zhodnocení

Trať pro měření daných prvků lze navrhnout mnoha způsoby. Předem je nutné upřesnit podmínky. Trať se může navrhnout například s důrazem na přesnost měření, nebo s ohledem na příznivou cenu zařízení. Měřící prvky lze volit přímé, nebo s převodníkem na analogový či digitální signál. Vše s různou přesností měření. Podle typu tekutiny, kterou je potřeba měřit mohou být rozvody z plastu, kovu a jiné. Je nutné zvážit jaký typ a velikost prvků bude potřeba měřit a jestli bude měření jednorázové, tedy jen pro změření daných prvků, nebo zda bude trať i dále využívána.

Pokud by se jednalo o jednorázové měření, nemělo by smysl pořizovat drahé zařízení. Navrhl bych levnější variantu s možností vypůjčení vhodných částí a měřidel. Naopak pokud by byla trať i v budoucnu využita pro školní měření, zařízení by mělo být kompletované jako jeden funkční celek, s vlastními definovanými prvky a měřidly. Jestliže by se od zařízení očekávala maximální životnost, kvalita, přesnost a třeba počítačově zpracované a doložené měření, muselo by se počítat s vyššími pořizovacími náklady.

4.2. Laboratorní zařízení katedry

V laboratoři Katedry hydromechaniky a hydraulických zařízení je k dispozici experimentální vodní trať pro měření místních ztrát s předdefinovanými prvky. Trať je opatřena nádrží o objemu 42 dm^3 a cirkulačním čerpadlem WILO RS 25/4 s možností regulace otáček. Charakteristika čerpadla je na obr. 4.1. K měření průtoku slouží průřezová clona. Potrubní rozvod s tlakovými odběry a clonou jsou z plastu. K regulaci množství vody (kromě regulace otáček čerpadla) je rozvod opatřen kulovým ventilem. Pro měření tlakové difference se zde používají plastové obrácené U–trubice. Přenos tlakové informace od měřeného místa k trubici se uskutečňuje pomocí plastových hadiček.



Obr. 4.1 Charakteristika čerpadla WILO [25]

Je zde možnost připojení dalších prvků pomocí hadice, proto budu své měření provádět na této trati. Vzhledem k vysokému počtu měřených prvků budu prvky k trati připojovat plastovými hadicemi sériově a provádět více měření najednou. Společné měření paralelně připojených prvků není možné, protože by patrně neproudilo ve větvích stejné množství vody. Měření jednotlivých prvků by byla zbytečně zdlouhavá.

4.3. Další způsoby měření

4.3.1. Měření objemového průtoku

Klasickou clonu lze nahradit mnoha typy průtokoměrů, vedle průřezových clon jsou obecně nejpoužívanější magneticko indukční průtokoměry. [16] Například typ Magnetoflow Primo DN 15 od firmy BADGER METER, u něhož může být nastaven průtok v rozsahu odpovídajícímu rychlostem proudění $0,1$ až 12 m.s^{-1} by plně vyhovoval. Garantována relativní přesnost při rychlosti proudění od $0,1$ do $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ je $1,25 \%$ a od $0,5$ do 12 m.s^{-1} pak $0,25 \%$. Průtokoměr je vybaven digitálním zobrazením hodnoty, analogovým signálem $4 - 20 \text{ mA}$ i Hart protokolem.



Obr. 4.2 Indukční průtokoměr Magnetoflow Primo [29]

4.3.2. Měření tlaku a tlakové difference

Místo U-trubice pro měření statického tlaku vody lze použít deformační tlakoměry. Stoupá však nepřesnost měření, respektive se zdvojnásobuje (při stejných přesnostech manometrů). Řešením by bylo použití diferenčního manometru. Protože budu měřit prvky mající změnu průřezu (např. difusor) a jejich měření budu provádět za průtoku v obou směrech, měl by mít diferenční manometr rozsah od nuly do plusové i minusové hodnoty. Oproti trubicovým měřidlům se zde musí počítat s pracnějším odvzdušňováním, které se musí provádět povolením šroubení. Navíc se při této manipulaci nesmí překročit maximální difference přístroje, aby nedošlo k jeho poškození. Proto bych deformační manometry pro mé měření nedoporučoval.

Pro přenos měřené tlakové difference do softwaru by byl vhodnou alternativou tlakový snímač s elektrickým výstupem. Například typ 2051C SMART od firmy EMERSON je vhodný pro plyny i kapaliny a lze nastavit na rozsah měření od - 6,21 do + 6,21 kPa s přesností měření 0,1 %, což by vyhovovalo rozsahu, který potřebuji měřit. Přístroj je vybaven digitálním zobrazením hodnoty, analogovým signálem 4 – 20 mA i Hart protokolem.



Obr. 4.3 Snímač tlakové difference Rosemount 2051C SMART [26]

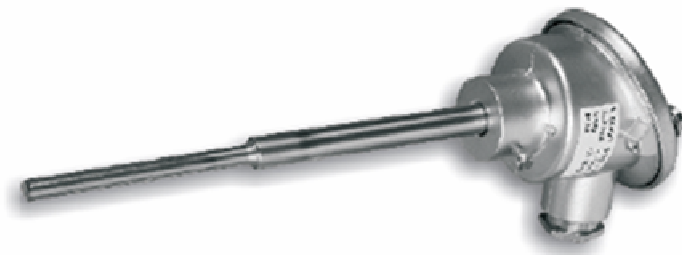
4.3.3. Měření teploty

Při provozu čerpadla a vlivem tlakových ztrát v obvodu dochází k přenosu tepla na cirkulující kapalinu. To má vliv na velikost její hustoty a viskozity kapaliny. Při výpočtech se proto bere v úvahu také změna teploty. K jejímu měření postačí běžný průmyslový bimetalový teploměr s jímkou, například typ 45 od firmy WIKA s rozsahem 0 - 60 °C (obr. 4.4).



Obr. 4.4 Bimetalový teploměr WIKA [30]

Pro přenos teploty do PC by byl vhodný například odporový snímač teploty typ PTS 81 od firmy SENSIT s programovatelným převodníkem 4 - 20 mA (obr. 4.5). Maximální rozsah měření -50 až 400°C. Absolutní chyba měření při nastaveném rozsahu měření od 0 do 60 °C je menší než 0,35 °C .



Obr. 4.5 Odporový snímač teploty PTS 81 [27]

4.3.4. Materiál rozvodu

Jako materiál pro vodu lze zvolit plast nebo kov (běžná ocel s protikorozní úpravou, nerez). Pro zhotovení tratě bych volil plast. Přesto, že má oproti kovu nižší pevnost a modul pružnosti, lépe se spojuje a je levnější. Pozinkované potrubí je přibližně 10x, nerezové dokonce více jak 20x dražší než plastové.

4.4. Principy uvedených měřidel

4.4.1. Průtok

Clona

Princip měření clony využívá jev provázející zúžení průtočného průřezu. Rozdíl statických tlaků v tekutině před zúžením p_1 a za zúžením p_2 , snímáný rozdílovým tlakoměrem, je závislý na hodnotě průtoku.

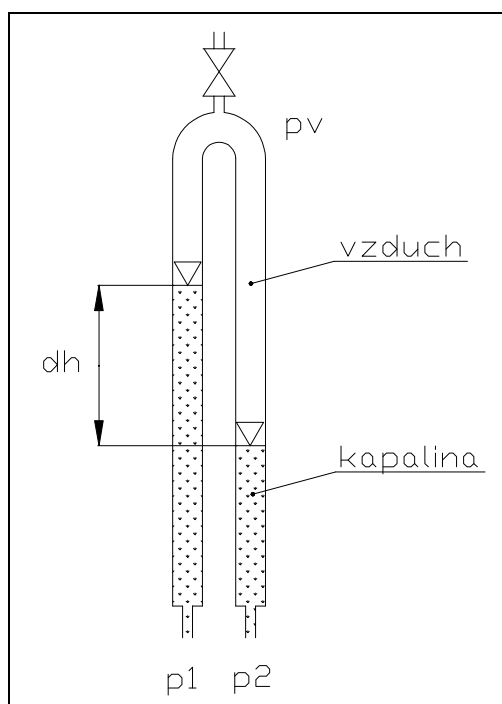
Indukční průtokoměr

Indukční průtokoměry jsou založeny na využití Faradayova zákona o elektromagnetické indukci při pohybu vodiče v magnetickém poli. Vodič v tomto případě představuje proudící kapalina. Indukované napětí je snímáno dvěma protilehlými elektrodami. Indukční průtokoměry jsou určeny pro měření vodivých kapalin.

4.4.2. Tlak

Obrácená U-trubice

Obrácená U-trubice (obr. 4.6), na které budu měřit tlakovou diferencí, patří mezi kapalinové tlakoměry. Přímě na ní se odečítají výšky hladin statických tlaků. Z důvodů omezené měřicí výšky trubic se neměří hladina vzhledem k atmosférickému tlaku, ale prostor nad hladinami je vůči němu uzavřen. Vstupující kapalinou v trubici je vytvářen přetlak vzduchu p_v , který lze regulovat odvzdušňujícím ventilkem a udržovat tak měřenou hladinu v přijatelných mezích.



Obr. 4.6 Obrácená U-trubice

Deformační tlakoměr

U deformačních tlakoměrů je měření tlaku převedeno na měření deformace způsobenou měřeným tlakem. Elastické členy působí v mezích pružných deformací. Elastickým členem může být Burdonova trubice nejčastěji tvaru kruhového oblouku, membrána nebo vlnovec.

Deformační snímač s elektrickým výstupem

Pro převod deformace elastických členů lze využít téměř všech dostupných principů aktivních i pasivních elektrických převodů. U trubicových manometrů je častým řešením

prodloužená hřídelka ručičky spojená s odporovým potenciometrickým vysílačem. Změna deformace pružného členu se měří odporovým tenzometrem. U membrán je možné převádět průhyb jejich středu pomocí indukčních, indukčnostních, kapacitních nebo potenciometrických snímačů posunutí.

4.4.3. Teplota

Bimetalový teploměr

Využívá k měření teploty bimetalový pásek složený z dvou kovů s různými činiteli tepelné roztažnosti. Při změně teploty se pásek ohýbá a tento pohyb se přenáší na ručičku přístroje.

Odporový snímač teploty

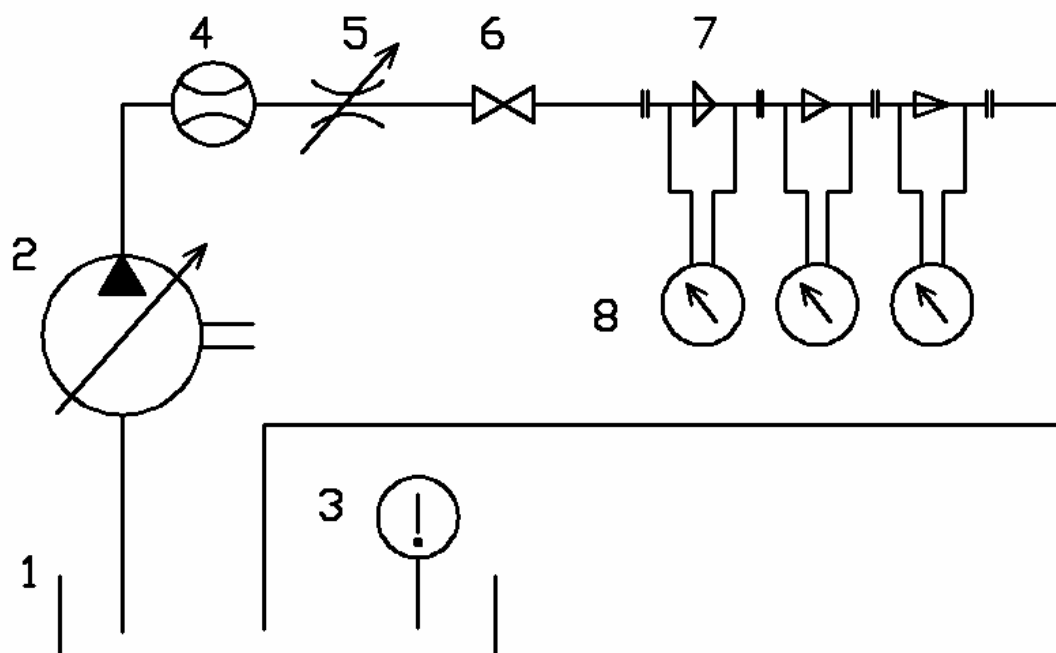
Je založen na poznatku, že odpor kovového vodiče se mění s teplotou. Měřicí kov je navinut na slídové desce. Nejčastěji se používá platina, měď nebo nikl. Měřicí obvod je zapojen do Wheatsonova můstku a změna odporu se měří nulovou nebo výchylkovou metodou.

4.5. Hydraulické schéma tratě

4.5.1. První návrh

V prvním návrhu regulační hydrogenerátor čerpá vodu z nádrže přes clonu, škrtící a uzavírací ventil přímo do rozvodu. Měřené prvky jsou sériově připojovány na konci trati. Uzavírací ventil při výměně měřených prvků nedovoluje zavzdušnění trati. Teplota vody se měří v nádrži.

Nevýhodou této trati je, že vstupující tlak vody do trati přímo z čerpadla částečně pulsuje a do systému se přenáší také vibrace od elektromotoru. Následky jsou rozkmit a jistá nepřesnost měření.



Obr. 4.7 Měřicí trasa s uzavřeným okruhem výtlaku

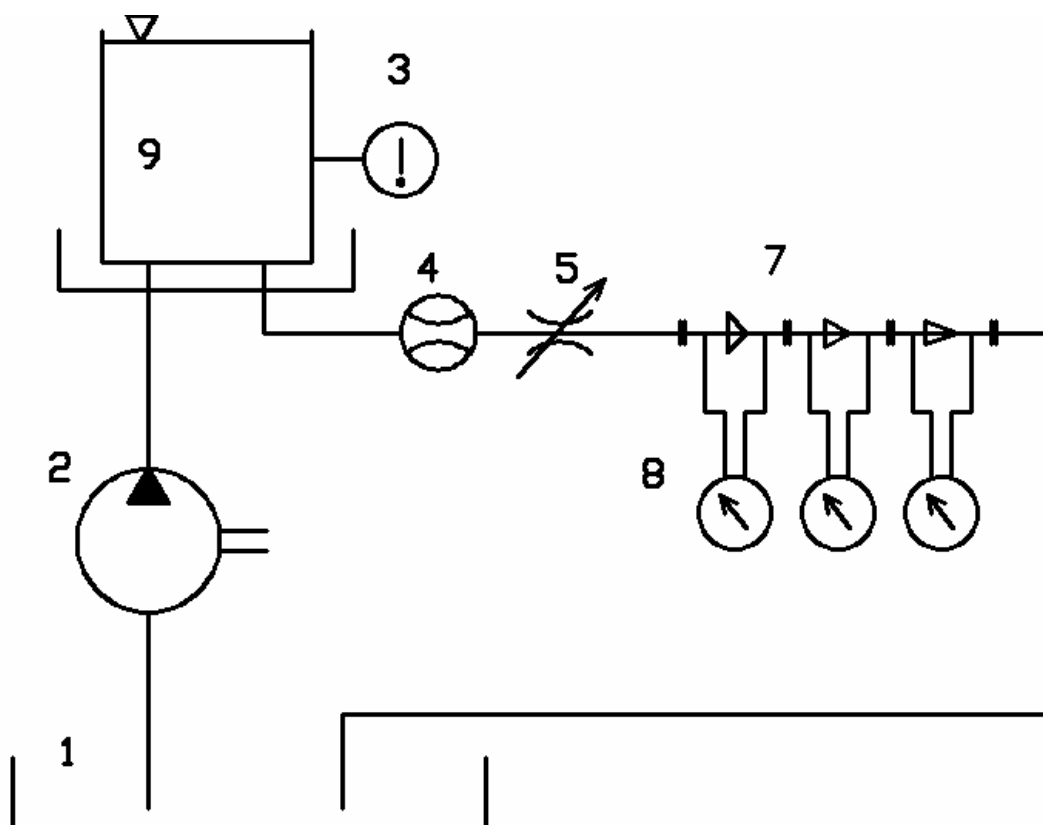
Popis obrázku 4.7:

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Nádrž | 5. Škrťací ventil |
| 2. Hydrogenerátor (čerpadlo) | 6. Uzavírací ventil |
| 3. Teploměr | 7. Sériově zapojené měřené prvky |
| 4. Průtokoměr | 8. Diferenční tlakoměry |

4.5.2. Druhý návrh

Ve druhém návrhu volím trať s přívodem kapaliny z přepadové nádrže. Čerpadlo ze spodní nádrže dopouští vodu do horní přepadové nádrže, z níž se voda pouští do rozvodu samospádem, tedy pouze o své potenciální energii. Teplota vody se měří v přepadové nádrži.

U této varianty je eliminován přenos vibrací a pulsace tlaku od čerpadla. Nedocílí se takového tlaku v rozvodu jako u uzavřeného okruhu. Limitující bude výška umístění přepadové nádrže. Z důvodů nižšího tlaku může nastat problém při odvzdušňování trasy, zvláště při vyšším počtu objemných prvků.



Obr. 4.8 Měřicí trasa s přívodem kapaliny z přepadové nádrže

Popis obrázku 4.8:

- | | |
|------------------------------|----------------------------------|
| 1. Nádrž | 6. Uzavírací ventil |
| 2. Hydrogenerátor (čerpadlo) | 7. Sériově zapojené měřené prvky |
| 3. Teploměr | 8. Diferenční tlakoměry |
| 4. Průtokoměr | 9. Přepadová nádoba |
| 5. Škrťací ventil | |

5. Cejchování clony

5.1. Úvod

Na trati byla k určování průtočného množství vody použita průřezová clona. Protože se na této cloně měří jen tlakový rozdíl, bylo potřeba znát ke každému naměřenému tlakovému rozdílu odpovídající průtočné množství. Hledal jsem proto funkční závislost mezi

tlakovým rozdílem a skutečným množstvím protékající vody na cloně. Jako porovnávací měřidlo byl použit ultrazvukový průtokoměr typ FL 1014 od firmy ELIS s nejistotou měření 0,5 % .

5.2. Postup

1. Provedl jsem sériové zapojení porovnávacího průtokoměru do obvodu.
2. Zapnul jsem čerpadlo a odvzdušnil celou trasu.
3. Při plném průtoku jsem odečetl hodnotu množství protékající vody a rozdíl tlaků na cloně.
4. V dalších krocích jsem postupně omezoval průtok škrtící armaturou a zapisoval obě hodnoty až do maximálního přivření.
5. Přivírání průtoku vody bylo prováděno tak, aby hodnoty byly zaznamenávány přibližně rovnoměrně po celém rozsahu průtoku. Provedeno bylo 15 měření.

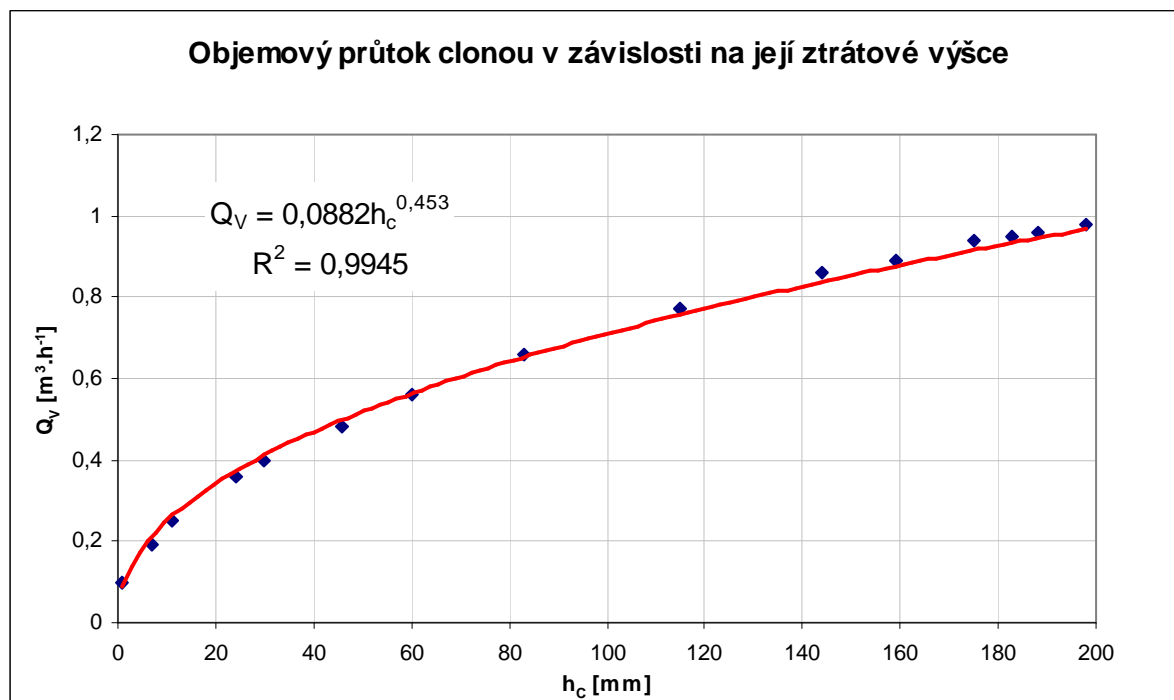
5.3. Vyhodnocení

Qv	Δh_c	Qv	Δh_c
[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]
0,98	198	0,56	60
0,96	188	0,48	46
0,95	183	0,4	30
0,94	175	0,36	24
0,89	159	0,25	11
0,86	144	0,19	7
0,77	115	0,1	1
0,66	83	-	-

Tab. 2 Naměřené hodnoty

Pro aproximaci bodů vhodnou funkcí jsem použil program Excel. Hodnoty jsem zadal do tabulky a vytvořil bodový graf, ke kterému jsem přiřadil spojnicí trendu se zobrazením rovnice regrese a hodnoty spolehlivosti. Obvykle se volí takový typ trendu a regrese, aby hodnota spolehlivosti byla co nejbližší hodnotě „1“.

Pro dané body vycházela nejlépe hodnota spolehlivosti u polynomicke funkce vyššího řádu. V tomto případě jsem volil mocninnou funkci, protože její průběh byl patrný z naměřených hodnot. Výsledným grafem je cejchovní křivka (obr. 5.1). Hodnota spolehlivosti je 0,9945.



Obr. 5.1 Cejchovní křivka clony.

6. Měření a grafické vyhodnocení místních ztrát

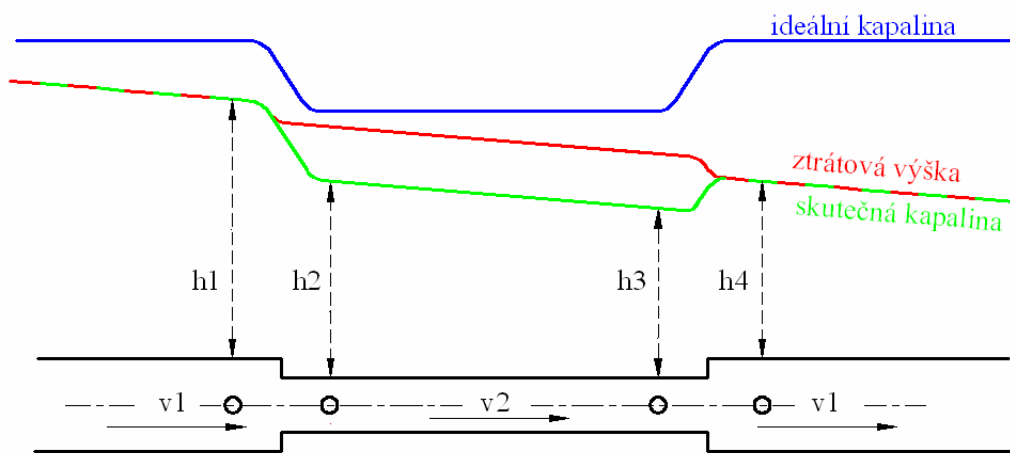
Byly prováděné čtyři série měření včetně jejich vyhodnocení. Všechny naměřené a vypočtené hodnoty jsou tabulkově zpracovány v přílohách. Naměřené hodnoty jsou zobrazené modrou barvou a vypočtené černou barvou. V přílohách je také názorně předveden výpočet prvního řádku tabulky pro každou sérii měření.

6.1. Skutečné ztráty na změně průřezu

Se změnou průřezu se kromě energetické ztráty část kinetické energie přeměňuje na tlakovou (při rozšíření průřezu) nebo tlakové energie na kinetickou (při zúžení průřezu). Při

rozšíření tedy může nastat situace, že přeměněná tlaková energie bude vyšší než ztráta a celková diference $p_1 - p_2$ bude minusová nebo nulová. Při zúžení průřezu bude tlakový pokles vyšší, než kdyby byl způsobený pouze energetickou ztrátou. Zdůvodnění dává Bernoulliho rovnice.

Pokud je změna průřezu jen na části úseku potrubí a poté se průřez vrátí na původní velikost a tvar platí, že před i za touto změnou je stejná kinetická energie a tlaková diference je rovná skutečné ztrátě na tomto úseku. Této skutečnosti jsem využil při porovnávání mého prvního měření. Zvolil jsem potrubní úsek, kde se průřez náhle zúžil z $d = 18 \text{ mm}$ na $d = 12,9 \text{ mm}$ a po určité délce zpět rozšířil viz obr. 6.1. Změřil jsem rozdíly hydrostatické výšky hladin před a za zúžením (h_1, h_2) a také před a za rozšířením (h_3, h_4). Výpočtem jsem zjistil a sečetl skutečné ztrátové výšky na obou změnách průřezů. Hodnota se měla rovnat změřenému rozdílu hydrostatických hladin před zúžením a za rozšířením (h_1, h_4), od kterého jsem odečetl rozdíl hladin za zúžením a před rozšířením (h_2, h_3) způsobený třecími ztrátami na délce zúženého úseku.



Obr. 6.1 Průběh hydrostatické výšky na změně průřezu potrubí

Dle kapitoly 3.3 jsem provedl 12 měření při různých průtocích. Z naměřených hodnot jsem dle rovnice 3.3 spočítal rychlosti proudění v_1 a v_2 a skutečnou ztrátovou hladinu na obou změnách průřezu úpravou vzorců 3.6 a 1.3 takto, pro zúžení:

$$h_{zz} = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} + (h_1 - h_2) \quad [\text{mm}] \quad (6.1)$$

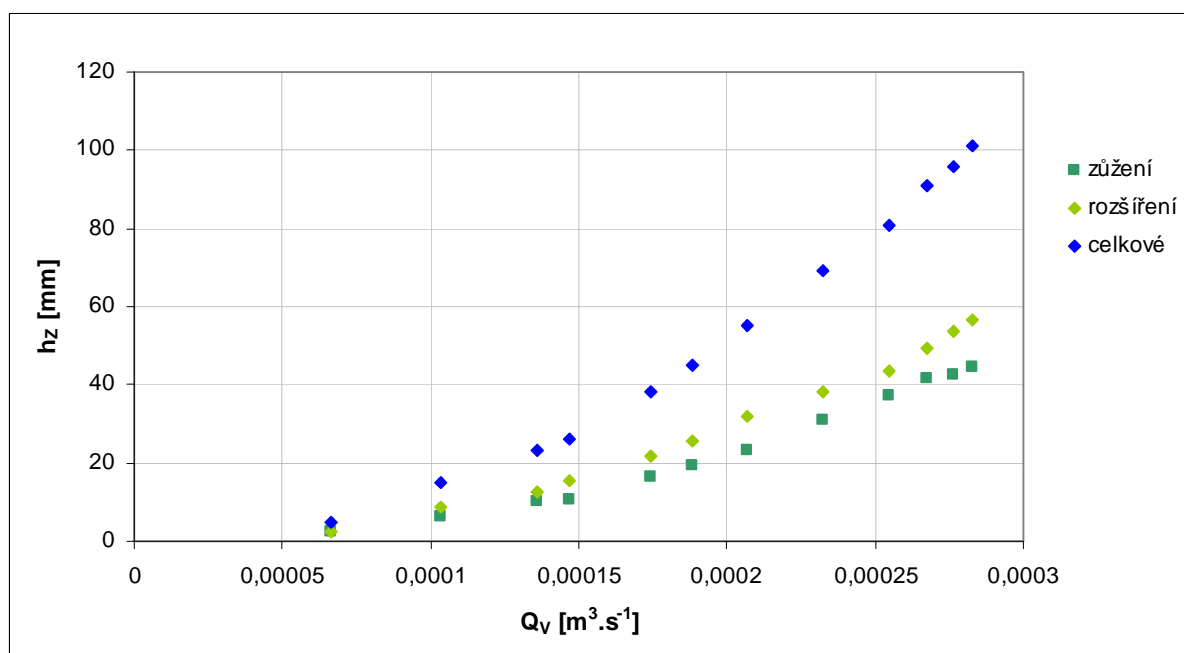
pro rozšíření:

$$h_{ZR} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} + (h_3 - h_4) \quad [\text{mm}] \quad (6.2)$$

Skutečná celková ztrátová hladina h_{ZCV} výpočtem na rozšíření a zúžení je tedy po sečtení:

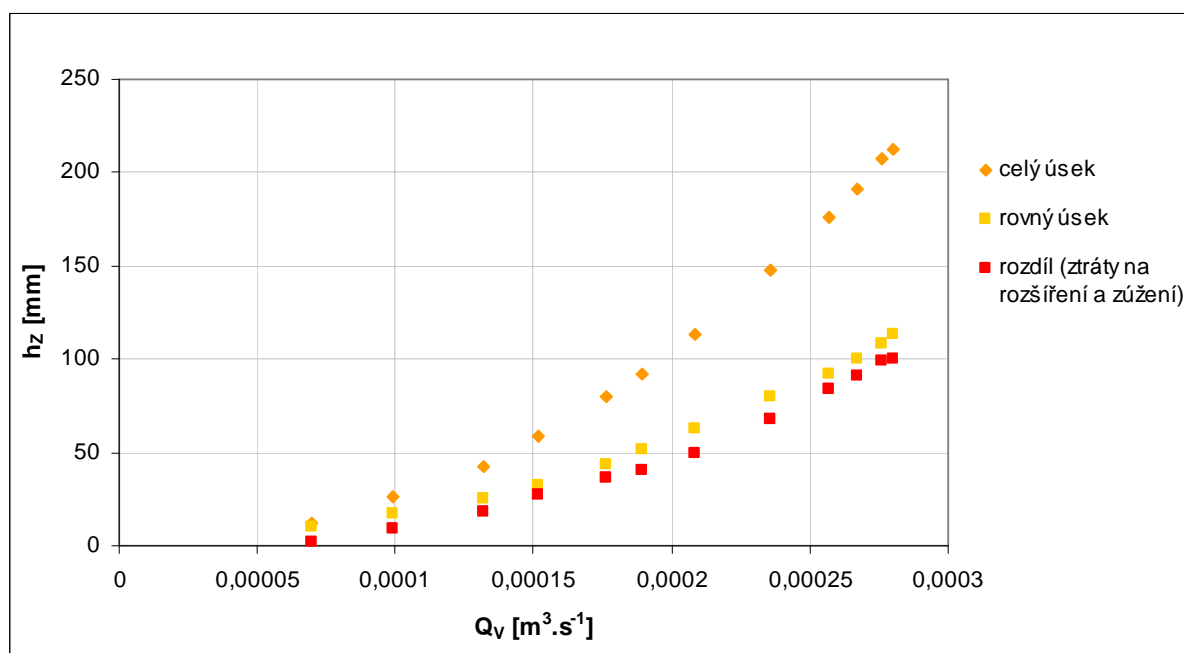
$$h_{ZCV} = h_{ZZ} + h_{ZR} \quad [\text{mm}] \quad (6.3)$$

Do prvního grafu (obr. 6.2) jsem vložil tyto vypočtené ztrátové hladiny v závislosti na průtoku.



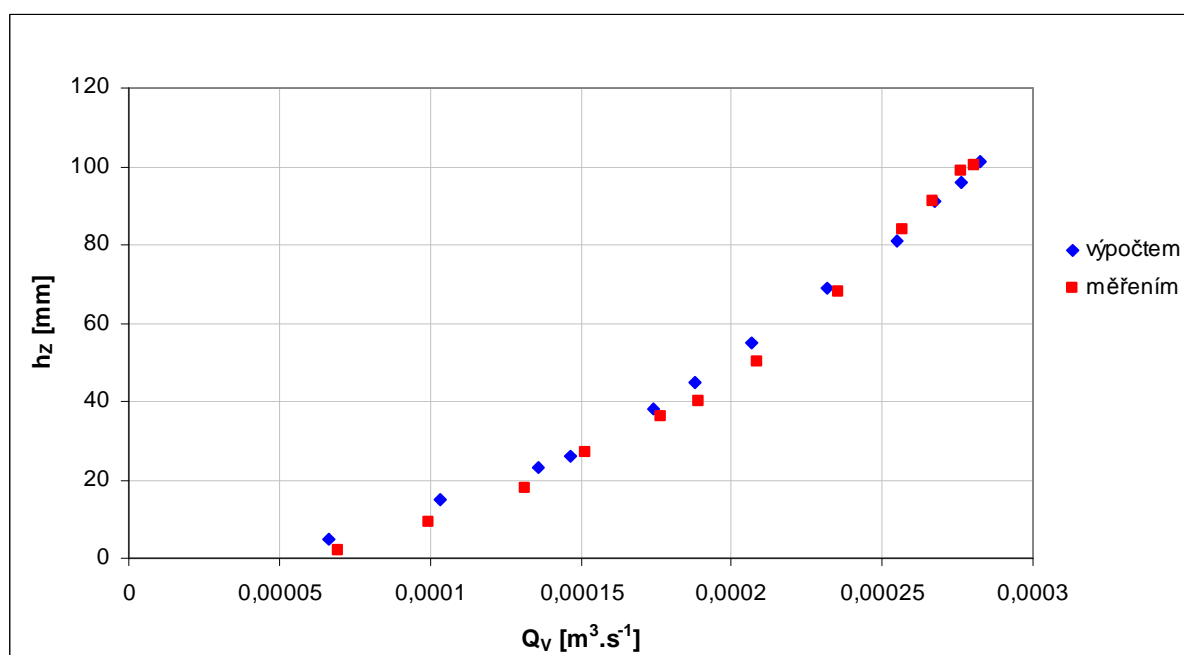
Obr. 6.2 Vypočtená ztrátová hladina na zúžení a rozšíření v závislosti na průtoku

Do druhého grafu (obr. 6.3) jsem vložil změřenou ztrátovou hladinou celého úseku (rozdíl $h_1 - h_4$), ztrátovou hladinu na rovném úseku (rozdíl $h_2 - h_3$) způsobenou třecími ztrátami v závislosti na průtoku a jejich rozdíl.



Obr. 6.3 Ztrátová hladina na celém úseku, na rovném úseku a jejich rozdíl v závislosti na průtoku

Třetí graf (obr. 6.4) je již porovnání naměřeného rozdílu hydrostatických hladin $h_1 - h_4$ bez středového úseku $h_2 - h_3$ a vypočteného součtu ztrátových hladin na zúžení a rozšíření h_{zcv} .

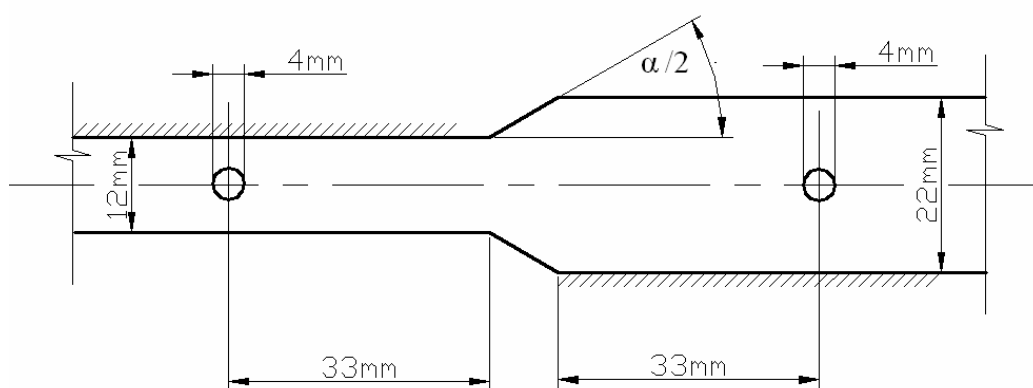


Obr. 6.4 Porovnání vypočtené a přímo měřené ztrátové hladiny zúžení a rozšíření v závislosti na průtoku

Jak je vidět, hodnoty výpočtu a měření jsou až na mírné odchylky totožné, potvrdila se tedy přesnost měření a výpočtu zahrnující změnu kinetické a tlakové energie.

6.2. Vliv úhlu pozvolné změny průřezu na součinitel místní ztráty

Pozvolný přechod snižuje energetické ztráty na změně průřezu. Při druhém měření jsem se snažil zjistit změnu této energetické ztráty v závislosti na úhlu rozšíření a zúžení průřezu. Protože dostupné zdroje uvádí tyto závislosti pouze do malých úhlů, zvolil jsem a nechal vyrobít difuzory o úhlech 30° , 60° a 90° o jednotných světlostech potrubí $d_1 = 12 \text{ mm}$ a $d_2 = 22 \text{ mm}$ (obr. 6.5). Měření bylo provedeno v obou směrech tedy i na konfuzoru. Nejdříve jsem z naměřených a vypočtených hodnot sestavil grafickou závislost ztrátové hladiny na průtoku a ztrátového součinitele ζ na Re-čísle pro rychlost v_2 . Poté jsem sestavil závislost ztrátového součinitele ζ pro úhly 30 , 60 a 90° mého měření a doplnil hodnoty této závislosti pro úhly 10 a 20° uváděné v literatuře [5]. Re-čísla i ztrátové součinitele jsem vztahoval u všech výpočtů k rychlosti v_2 .



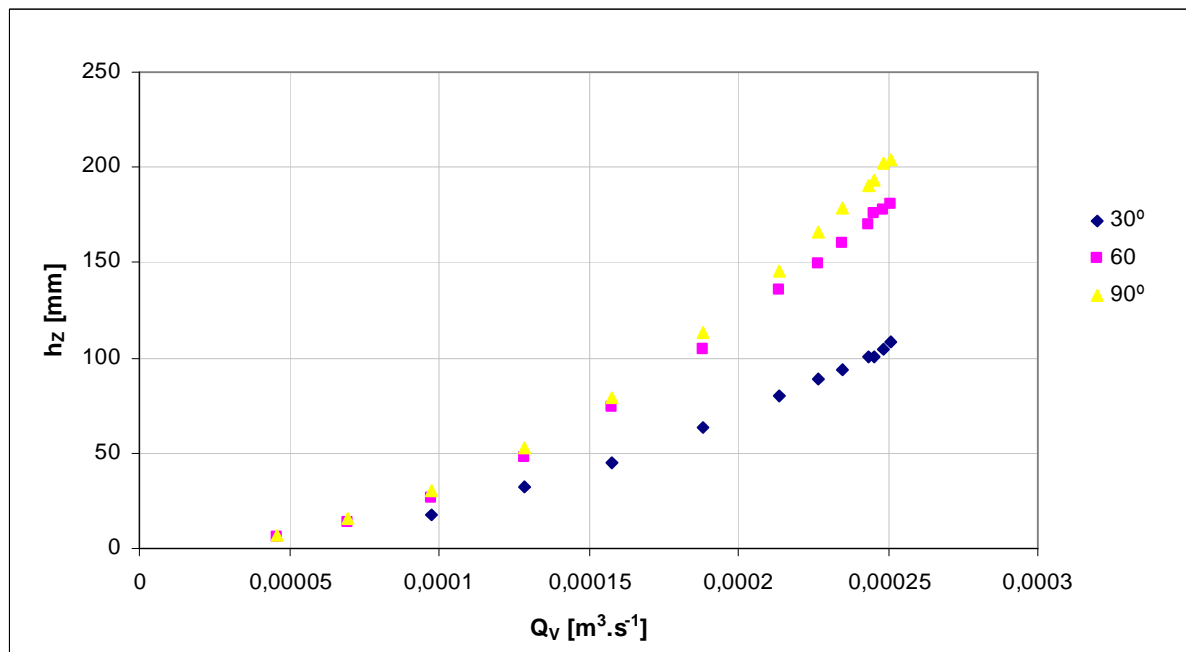
Obr. 6.5 Základní vnitřní rozměry měřených difuzorů

6.2.1. Difuzor

Dle kapitoly 3.3 jsem provedl minimálně 13 měření při různých průtocích na všech třech difuzorech. Z naměřených hodnot jsem dle rovnice 3.3 vypočítal rychlosti proudění v_1 a v_2 a skutečné ztrátové hladiny na rozšíření úpravou vzorců 3.6 a 1.3 takto:

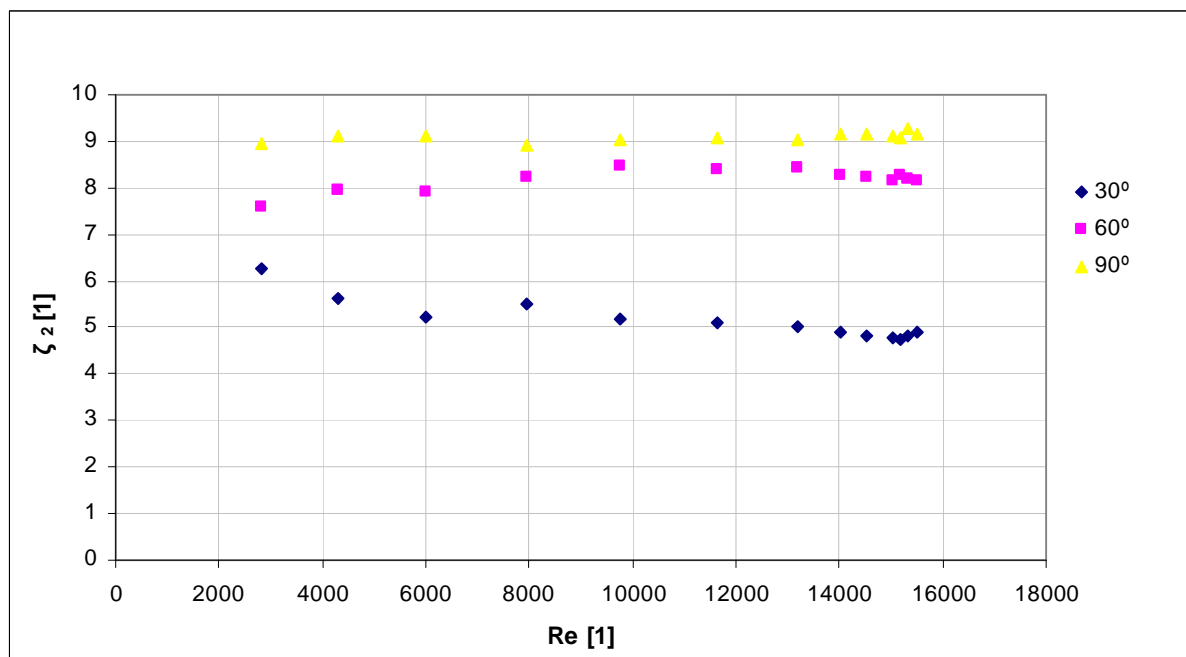
$$h_z = \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} + (h_1 - h_2) \quad [\text{mm}] \quad (6.4)$$

V grafu (obr. 6.6) je zachycena závislost skutečné ztrátové hladiny na průtoku difuzorem.



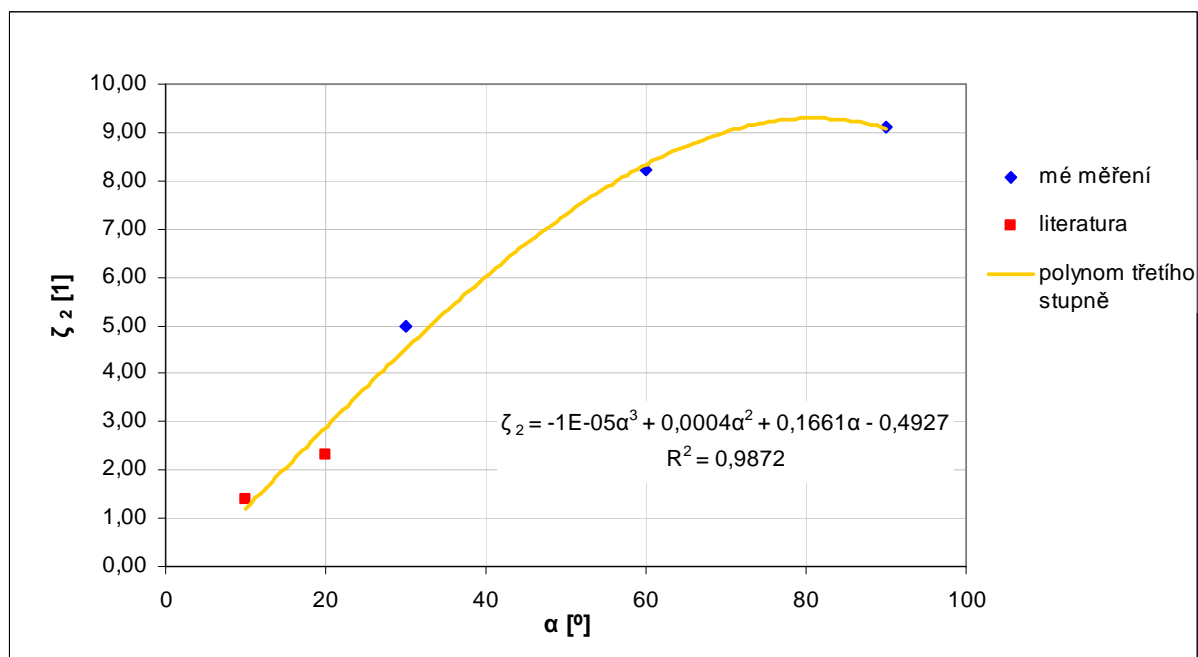
Obr. 6.6 Závislost skutečné ztrátové hladiny na průtoku difuzorem

V dalším kroku byly dosazením do vzorců 1.6 a 3.7 z naměřených hodnot vypočteny Re-čísla a ztrátové koeficienty ζ . V grafu (obr. 6.7) je zobrazena jejich vzájemná závislost.



Obr. 6.7 Závislost součinitele místní ztráty na Re-číslu pro rychlost proudění difuzorem v_2

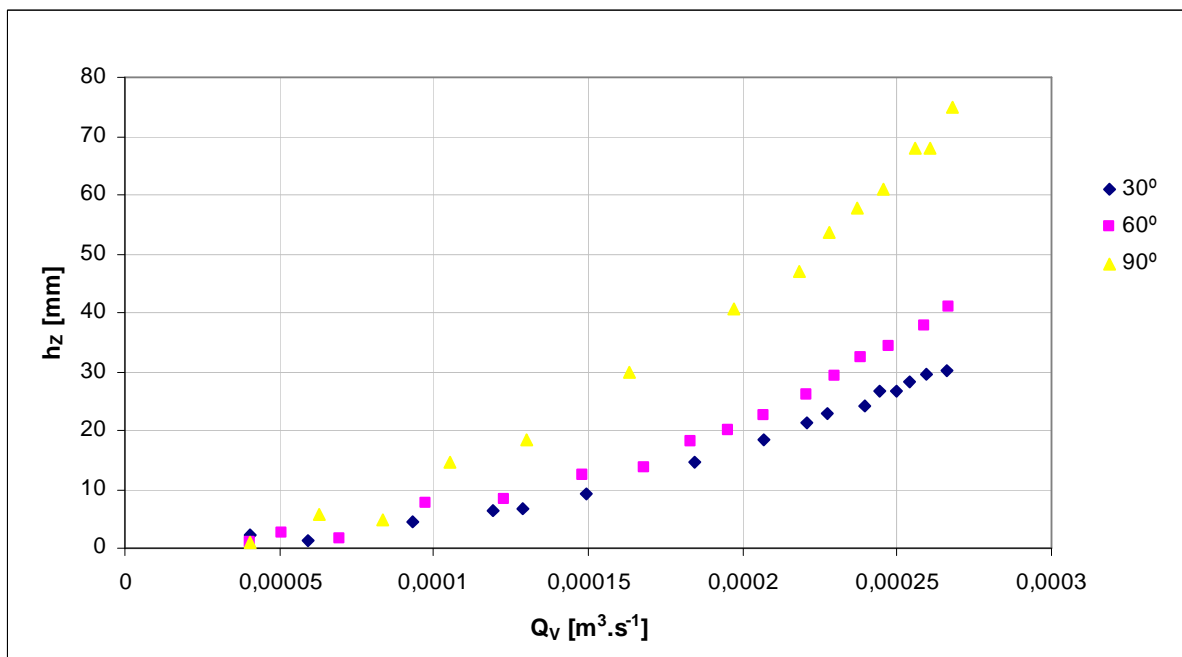
Nakonec jsem vytvořil graf závislosti ζ_2 na úhlu α (obr. 6.8). Z vypočtených ztrátových součinitelů ζ_2 pro každý difuzor jsem vybral průměrnou hodnotu, avšak pro větší přesnost pouze z těch hodnot, kde relativní chyba měření vzhledem ke ztrátové hladině nepřesáhla 4 %. Do grafu jsem přidal i dvě hodnoty závislosti ζ_2 na úhlu α uváděné v literatuře [5] a zadal spojnici trendu a rovnici regrese.



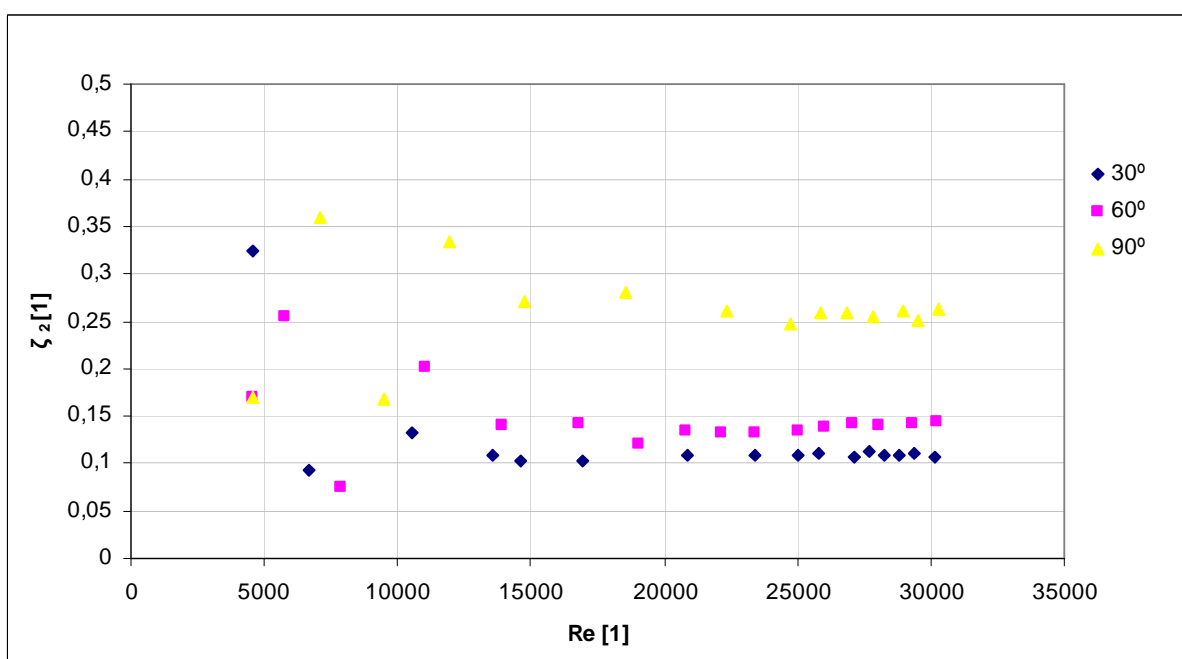
Obr. 6.8 Závislost součinitele místní ztráty na úhlu rozšíření difuzoru pro rychlost v_2

6.2.2. Konfuzor

Stejný postup měření, výpočtu a porovnání jako u difuzorů byl proveden při průtoku v opačném směru tedy na konfuzoru .



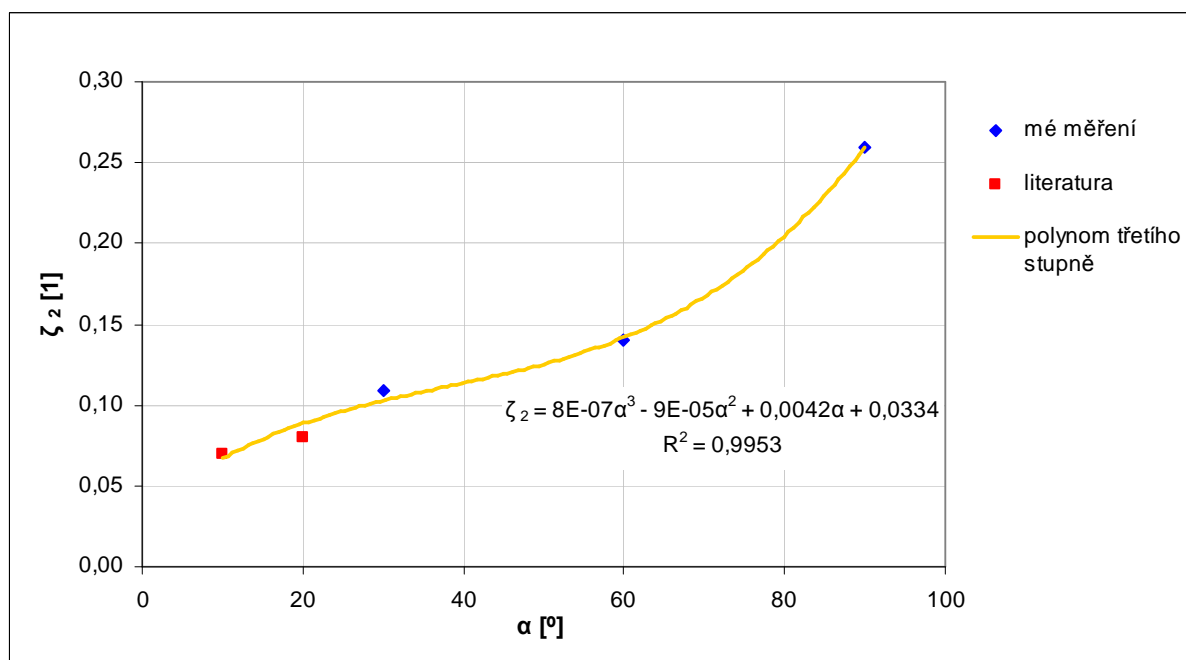
Obr. 6.9 Závislost skutečné ztrátové hladiny na průtoku konfuzorem



Obr. 6.10 Závislost součinitele místní ztráty na Re-čísle pro rychlost proudění konfuzorem v_2

Na grafech je při nižších průtocích a Re číslech patrný vyšší rozkmit h_z , je to způsobeno tím, že vzhledem k nižší energetické ztrátě je nižší skutečná ztrátová hladina a tím poměrně vysoká relativní chyba měření. Pro sestavení závislosti ζ_2 na úhlu α jsem použil

hodnoty, kde relativní chyba měření vzhledem ke ztrátové hladině nepřesáhla 4 % a opět doplnil závislosti z literatury [5].



Obr. 6.11 Závislost součinitele místní ztráty na úhlu zúžení konfuzoru pro rychlost v_2

Hodnoty součinitele ζ u konfuzoru byly vypočteny pro rychlost proudění na zúžené straně, zatím co u difuzoru na straně rozšířené, pro další porovnání jsem ještě provedl přepočet součinitele konfuzoru ζ pro rychlost proudění v_1 větším průměrem dle vzorce 1.15 a vše zapsal do tabulky 3.

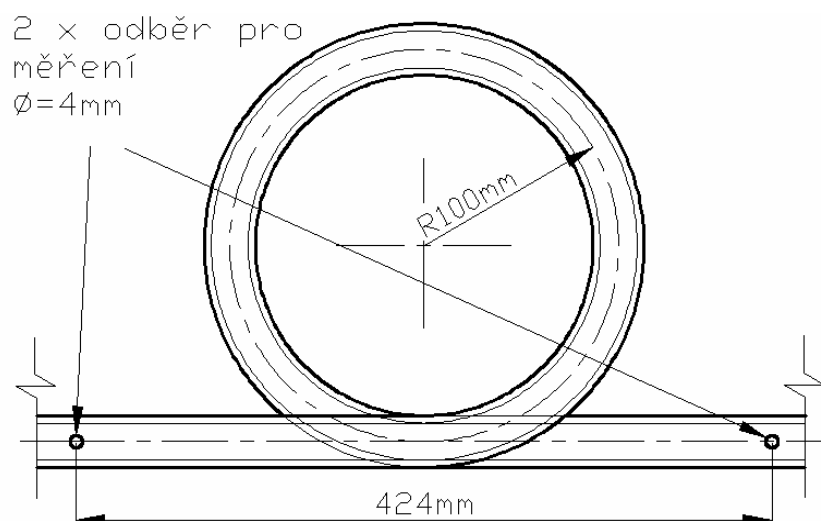
Konfuzor		difuzor	
α	ζ_1	α	ζ_2
10°	0,79	10°	1,40
20°	0,90	20°	2,30
30°	1,23	30°	4,97
60°	1,59	60°	8,24
90°	2,93	90°	9,11

Tab. 3 Ztrátové součinitelé k úhlům pro stejné průměry potrubí

Z tabulky je patrné, že vyšší energetické ztráty při stejných úhlech jsou na difuzoru, tedy na pozvolném rozšíření.

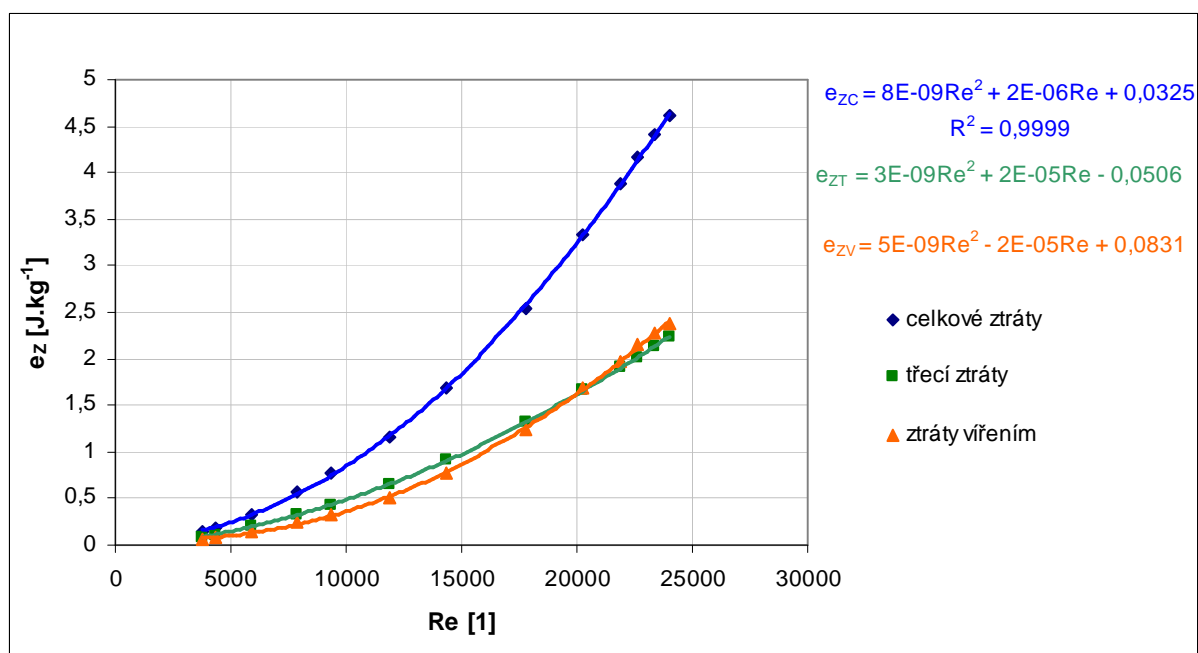
6.3. Ztráty vířením na kompenzační smyčce

Jak bylo vysvětleno v kapitole 2.2.2, celkové energetické ztráty na kompenzační smyčce jsou součtem třecích ztrát a ztrát vířením způsobených zakřivením profilu. Ve třetím měření jsem se pokusil nalézt alespoň přibližný poměr ztrát vířením ke ztrátám celkovým. Provedl jsem měření ztráty na smyčce a výpočet třecích ztrát na potrubí s charakteristickými rozměry (délka osy a průřez) jako má tato smyčka. Pro porovnání změny se změnou světlosti smyčky bylo měření provedeno na třech volně prodejných plastových smyčkách o vnitřních průměrech 14,4; 18 a 23,3 mm se stejnými poloměry zatočení osy smyčky $R = 100\text{ mm}$.

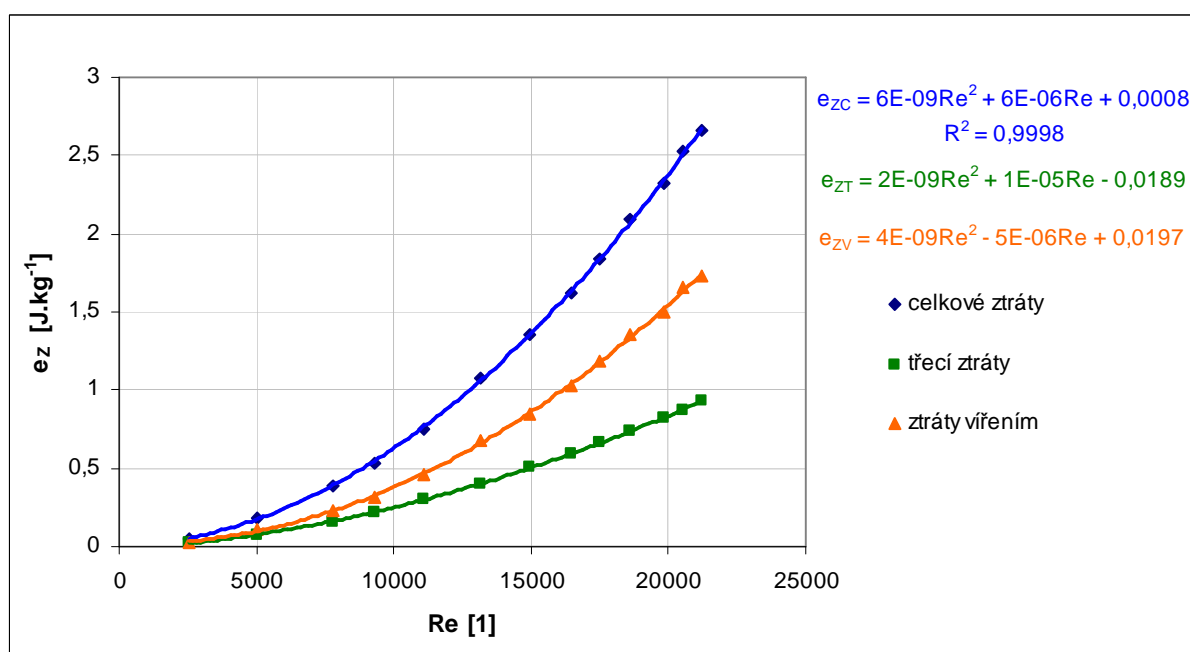


Obr. 6.12 Kompenzační smyčka $d = 18\text{ mm}$ – základní rozměry.

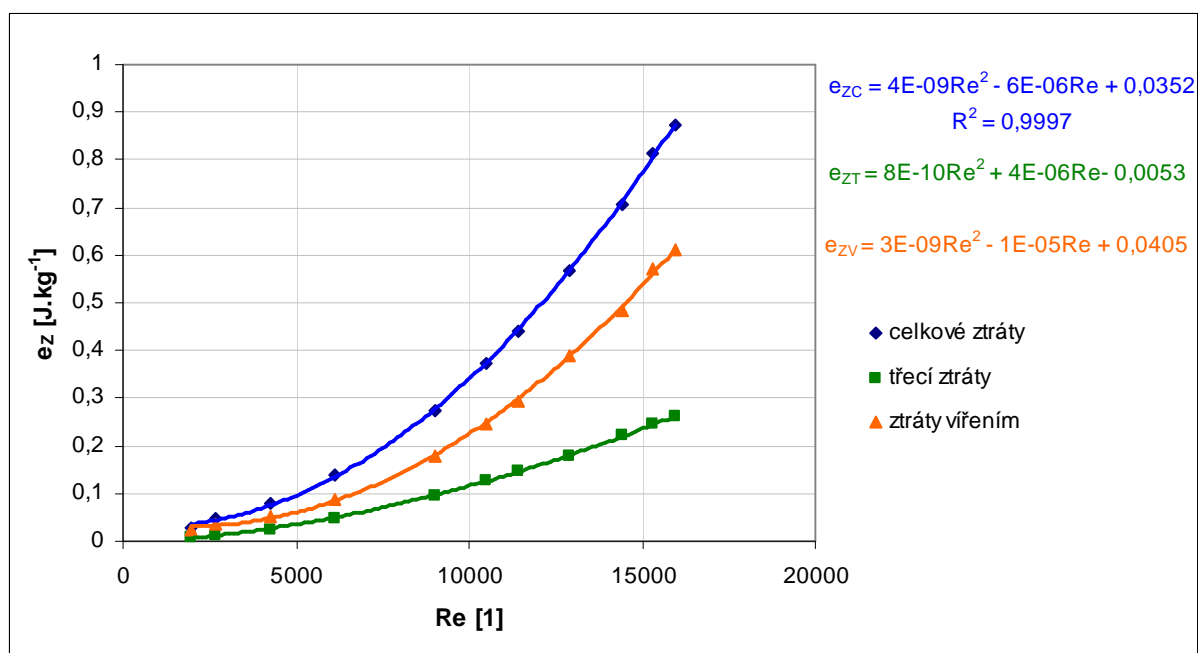
Dle kapitoly 3.3 jsem provedl minimálně 10 měření při různých průtocích na všech třech smyčkách, výpočet rychlosti proudění v a celkové ztrátové energie e_z použitím vzorců 3.3 a 3.6. Dále jsem spočítal pomocí vzorců 1.6, 1.10 a 1.4 ztrátovou energii způsobenou třením, a poté od sebe obě ztráty odečetl. Tím byly zjištěny ztráty vířením. Na obrázcích 6.13, 6.14 a 6.15 je sestavena jejich závislost na Re-čísle.



Obr. 6.13 Závislost měrné ztrátové energie smyčky $d = 14,4$ mm na Re-čísle

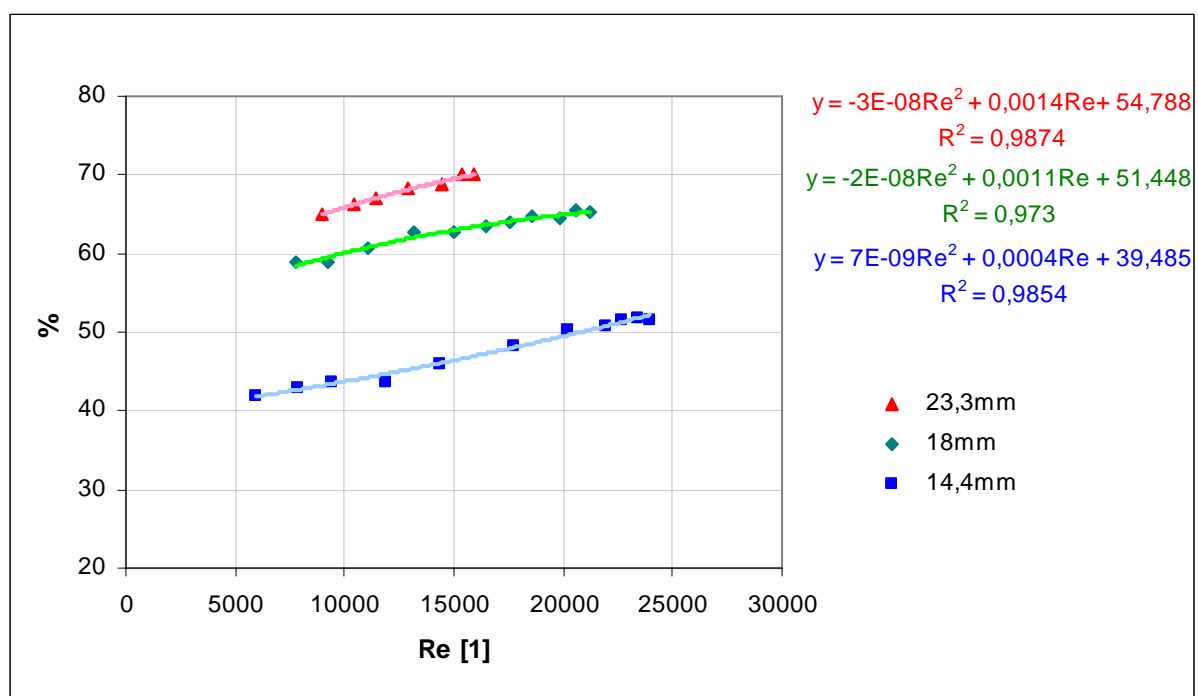


Obr. 6.14 Závislost měrné ztrátové energie smyčky $d = 18$ mm na Re-čísle



Obr. 6.15 Závislost měrné ztrátové energie smyčky $d = 23,3$ mm na Re-čísle

Pro přehlednost jsem vypočetl poměry ztrát vířením ke ztrátám celkovým a v procentech je pro všechny měřené průřezy zaznamenal do jednoho grafu (obr. 6.16). Pro větší přesnost jsem použil jen hodnoty, kde relativní chyba měření byla nižší než 4 %.

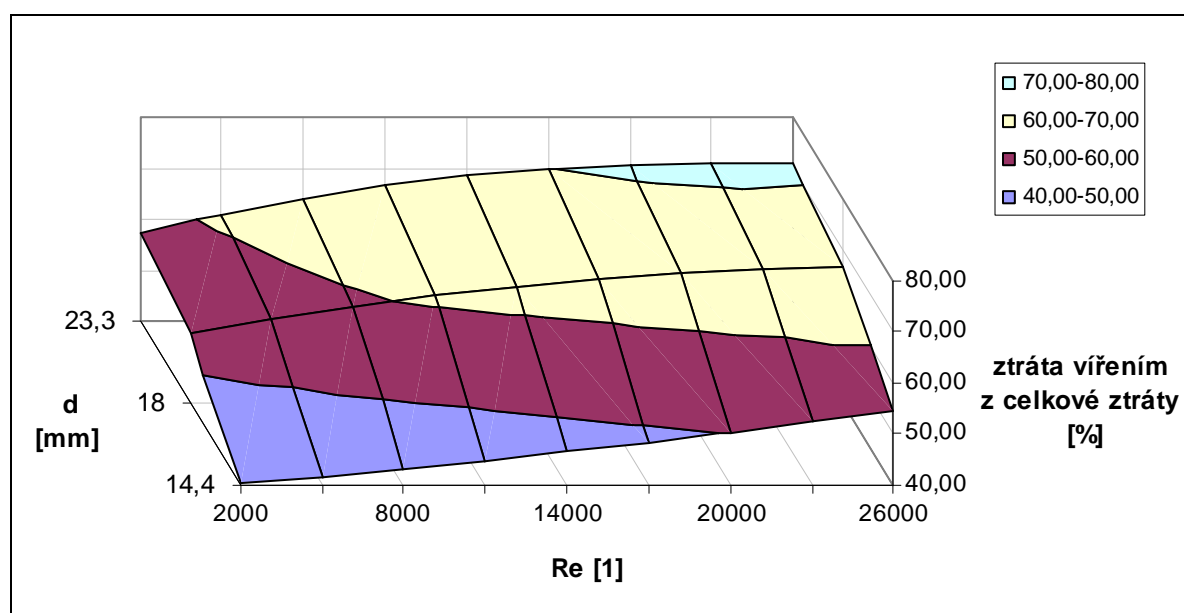


Obr. 6.16 Velikost ztráty vířením v celkové ztrátě smyčky v závislosti na Re-čísle

Rovnice regrese umožňuje sestavit tabulku 4 ve větším rozsahu než jen na měřených hodnotách Re a závislost zaznamenat v 3D grafu (obr. 6.17).

Ztráta [%]		d [mm]		
		14,4	18	23,3
Re	2000	40,31	53,57	57,47
	5000	41,66	56,45	61,04
	8000	43,13	58,97	64,07
	11000	44,73	61,13	66,56
	14000	46,46	62,93	68,51
	17000	48,31	64,37	69,92
	20000	50,29	65,45	70,79
	23000	52,39	66,17	71,12
	26000	54,62	66,53	70,91

Tab. 4 Vypočtené hodnoty z rovnic regrese



Obr. 6.17 Velikost ztráty vířením v celkové ztrátě smyčky v závislosti na Re -čísle a průměru smyčky

Na základě změřených a vypočtených hodnot lze říci, že poměr ztrát vířením ke ztrátám celkovým se zvyšuje se zvyšujícím se Re -číslem a průměrem smyčky. Vypočtené hodnoty poměru jsou oproti skutečnosti zatíženy určitou chybou. Tření na rovném úseku je

rovnoměrně rozloženo, zatím co při proudění smyčkou je nerovnoměrné a rychlost „otěru“ tekutiny a tlak na vnitřní stěně se s rychlostí mění.

7. Vyhodnocení chyb měření

Při každém měření vznikají určité chyby. Absolutní chybou měření Δ rozumíme rozdíl mezi naměřenou hodnotou x_m a skutečnou pravou hodnotou x měřené veličiny.

$$\Delta = x_m - x \quad [\text{dle veličiny}] \quad (7.1)$$

Chyby, které mohou vzniknout při měření, dělíme na hrubé, systematické a náhodné.

Hrubé chyby při mém měření mohly vzniknout nepozorností nebo omylem. Měření zatížená těmito chybami by se vyznačovala nápadně velkými rozdíly v naměřených hodnotách, proto je vylučuji.

Systematické chyby jednosměrně zkreslují výsledek měření. Mohou být způsobeny špatně zvolenou metodou měření nebo přístrojovou chybou. Můžeme je poměrně snadno odstranit vhodnou kalibrací přístroje. Systematické chyby jsou nebezpečné, neboť se opakovaným měřením neruší a nelze je odstranit výpočtem. Do systematických chyb řadíme chybu přístroje. Na něj působí z důvodu nedokonalosti řada vnitřních rušivých vlivů. Každý z těchto vlivů zanáší do měření určitou chybu a přístroj jako celek pak vykazuje tzv. základní chybu, která je souhrnem všech těchto dílčích chyb. Charakteristika zahrnující všechny dílčí chyby se jmenuje třída přesnosti δ_{TP} a stanovuje ji výrobce. Definuje mezní absolutní chybu v celém měřicím rozsahu přístroje.

$$\delta_{TP} = \frac{|\Delta_m|}{x_R} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.2)$$

Relativní chyba přístroje stanovuje chybu z měřené hodnoty a je definována jako podíl mezní absolutní chyby přístroje k velikosti měřené hodnoty.

$$\delta_M = \frac{\Delta_m}{X} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.3)$$

Čím menší bude výchylka přístroje, tím větší bude relativní chyba měření. Při měření analogovými měřicími přístroji musíme volit takový rozsah přístroje, aby jeho výchylka byla co největší. Pak bude měření přesnější, protože chyba údaje bude malá. Nejvhodnější je, aby se výchylka pohybovala ve třetí třetině měřicího rozsahu, nejvýše však v jeho druhé polovině.

Při malých hodnotách výchylky dosahuje relativní chyba údaje vysokých hodnot a měření v oblasti počátku stupnice nemá smysl, protože je velmi nepřesné. [20]

Jinak jsem musel vykazovat relativní chybu u měření tlaku na U–trubici. Její přesnost se omezuje na chybu odečtu rozdílu hladin na měřidle délky, která je v případě svinovacího metru 1 mm . Při měření ztráty na změně průřezu jsem relativní chybu nepočítal dle vzorce 7.3 jako poměr mezní absolutní chyby k měřenému rozdílu hladin, ale jako poměr mezní absolutní chyby ke ztrátové výšce (Z měřené difference odečtená část výšky, která není ztrátová, nýbrž se přeměnila na vyšší rychlost proudění). Například při zúžení na konfuzoru $\alpha = 30^\circ$ při maximálním průtoku $0,95\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ je rozdíl hladin na U-trubici 288 mm a vzhledem k chybě odečtu 1 mm je relativní chyba velice malá. Ale ke ztrátové hladině, která je při stejném průtoku 30 mm , způsobí 1 mm relativní chybu $3,33\%$. Při průtoku $0,46\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, kdy je měřená difference 67 mm a skutečná ztrátová hladina 7 mm je relativní chyba už dokonce $14,8\%$. Kdybych bral tedy v potaz relativní chybu k měřené diferenci, pak by neodpovídala nepřesnosti skutečné ztráty.

Náhodné chyby jsou dány ne úplně kontrolovatelnými vnějšími vlivy. V mém měření to byly pulsace tlaku a vibrace od elektromotoru a čerpadla. Dá se předpokládat, že tyto vlivy zvyšují nebo snižují měřenou veličinu stejnou pravděpodobností. Pro upřesnění výsledku jsem měření za stejných podmínek opakoval. Provedl jsem N měření veličiny X . Výsledky měření byly x_1, \dots, x_N . Zajímal mě nejlepší odhad veličiny x_0 skutečné hodnoty x měřené veličiny X . Předpokládal jsem, že rozložení náhodných chyb je dáno normálním (Gaussovým) rozdělením tedy takové, že nejlepším odhadem skutečné hodnoty je aritmetický průměr.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7.4)$$

8. Závěr

V bakalářské práci jsem se zabýval zpracováním teorie o měření místních energetických ztrát na změně průřezu a kompenzační smyčce. Vytvořil jsem vlastní návrh měřicí trati a provedl čtyři série měření s vyhodnocením ztrát na vybraných prvcích.

V prvním měření jsem demonstroval problematiku energetické přeměny rychlosti a tlaku na změně průřezu a její separování od skutečné energetické ztráty.

Ve druhém a třetím měření jsem porovnával závislost energetické ztráty na úhlu pozvolného přechodu průřezu potrubí. Měření jsem prováděl na třech prvcích v obou směrech. Prokázal jsem jak pozitivní vliv má pozvolná změna na snižování ztrát. Ze všech měření proudění tekutiny prvkem v obou směrech vyplynulo, že vyšší ztráty energie vznikají vždy na rozšíření průřezu.

Ve čtvrtém měření jsem se pokusil definovat z celkové ztráty na kompenzační smyčce ztrátu vířením a třecí ztrátu. Podle výsledků měření vyplynulo, že ztráty vířením jsou oproti třecím ztrátám tím vyšší, čím vyšší je Reynoldsovo číslo a průměr smyčky.

Bakalářská práce svým rozsahem přispěla k mému hlubšímu porozumění a pochopení problému energetických ztrát nejen na vybraných prvcích.

Použitá literatura

- [1] NOSKIEVIČ, P. a kol. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL/ALTA, 1990.
- [2] JANALÍK, J.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin*. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. ISBN 80-248-0038-1
- [3] DRÁBKOVÁ, S.; KOZUBKOVÁ, M. *Cvičení z mechaniky tekutin*. Ostrava: VŠB-TUO, 2002. ISBN 80-248-0039-X
- [4] NOSKIEVIČ, P.; JANALÍK, J.; RÝC, Z.; ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin : příručka pro laboratorní cvičení*. Ostrava: VŠB-TUO, 1987.
- [5] DETERT, H.; JIRKA, G. H. *Hydraulik von Rohrsystemen*. Institut für Hydromechanik Universität Karlsruhe, 11/2002. URL: <http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/lehre/rohrhydraulik/download.htm>
- [6] JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Ostrava: VŠB-TU, 1995.
- [7] LEINVEBER, J.; VÁVRA, P. *Strojnické tabulky*. Úvaly: Albra, 2006. IBSN 80-7361-033-7
- [8] CONVERTER. *Viskozita vody v závislosti na teplotě*. Prosinec 2008. URL: <http://www.converter.cz/tabulky/viskozita-vody.htm>
- [9] CONVERTER. *Hustota hustoty destilované vody na teplotě*. Prosinec 2008. URL: <http://www.converter.cz/tabulky/hustota-vody.htm>
- [10] TERMOLUX. *Montážní předpis pro plastové potrubní systémy rozvodů studené pitné a teplé užitkové vody*. Prosinec 2008. URL: <http://www.termolux.cz/index.htm>
- [11] E-AUTOMATIZACE. *Slovníček pojmů*. Prosinec 2008. URL: <http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmr/v/ZY-Slovník.htm>
- [12] E-AUTOMATIZACE. *Rychlostní průtokoměry*. Prosinec 2008. URL: <http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks/mmr/v/0362.htm>
- [13] SKRIPTA. *Tlak, jeho měření*. Prosinec 2008. Technická Univerzita v Liberci. URL: http://www.kod.tul.cz/info_predmety/Aov/apv.htm
- [14] AUTOMA, časopis pro automatizační techniku. *Snímače tlaku*. Číslo 2000/4. URL: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=27665
- [15] AUTOMA, časopis pro automatizační techniku. *Deformační manometr v digitálním věku*. Číslo 2000/4. URL: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=30903

- [16] AUTOMA, časopis pro automatizační techniku. *Průtokoměry v současné praxi*. Číslo 2002/2. URL: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=28348
- [17] AUTOMA, časopis pro automatizační techniku. *Snímače průtoku – principy, vlastnosti a použití (1.část)*. Číslo 10/2006. URL: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=31399
- [18] SKRIPTA. *Chyby měření*. Prosinec 2008. Západočeská Univerzita v Plzni. URL: www.kfy.zcu.cz/prakt/Skripta/chyby_mereni.pdf
- [19] KRIVÁNKA, P. *Vyhodnocení chyb měření*. Prosinec 2008. URL: <http://home.zcu.cz/~krivanka/vyuka.html>
- [20] *MĚŘENÍ: Třída přesnosti*. ElektriKa.cz. URL: <http://elektriKa.cz/data/clanky/trida-presnosti/view>
- [21] Katalog výrobků GUNT Hamburk, 2008, Dostupný z <http://www.gunt.de/>
- [22] Katalog výrobků TecQuipment, 2008, Dostupný z <http://www.tecquipment.com>
- [23] Katalog výrobků Solution, 2008, Dostupný z <http://www.solution.com.my>
- [24] Katalog výrobků Armfield, 2008, Dostupný z <http://www.armfield.co.uk>
- [25] Katalog výrobků WILO, 2009, Dostupný z <http://www.wilo.cz/>
- [26] Katalog výrobků EMERSON, 2009, Dostupný z <http://www.emersonprocess.cz/>
- [27] Katalog výrobků SENSIT, 2009, Dostupný z <http://sensit.cz/>
- [28] Katalog výrobků EKOPLASTIK, 2009, Dostupný z <http://www.ekoplastik.cz/>
- [29] Katalog výrobků BADGER METER, 2009, Dostupný z <http://www.badgermeter.cz/>
- [30] Katalog výrobků WIKA, 2009, Dostupný z <http://www.wika.cz/>

Seznam příloh:

Příloha 1. Změna průřezu – naměřené a vypočtené hodnoty

Příloha 2. Difuzor – naměřené a vypočtené hodnoty

Příloha 3. Konfuzor – naměřené a vypočtené hodnoty

Příloha 4. Smyčky – naměřené a vypočtené hodnoty

Příloha 1. Změna průřezu – naměřené a vypočtené hodnoty

Zúžení průřezu $d = 18 \text{ mm} \rightarrow d = 12,9 \text{ mm}$

Δh_c	Q	$\Delta h (h_1-h_2)$	v_1	v_2	Δh_{id}	Δh_{zz}
[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[mm]
221	1,0174	220	1,1106	2,1623	175	45
210	0,9941	210	1,0852	2,1128	168	42
196	0,9635	199	1,0518	2,0478	157	42
176	0,9177	180	1,0017	1,9504	143	37
143	0,8353	149	0,9118	1,7753	118	31
111	0,7447	117	0,8129	1,5828	94	23
90	0,6772	97	0,7393	1,4394	78	19
76	0,6273	83	0,6848	1,3332	67	16
52	0,5282	58	0,5766	1,1227	47	11
44	0,4897	51	0,5346	1,0408	41	10
24	0,3721	30	0,4062	0,7909	23	7
9	0,2386	12	0,2605	0,5072	10	2

Výpočet pro první řádek tabulky:

$$Q = 0,0882 \cdot h_c^{0,453} = 0,0882 \cdot 221^{0,453} = 1,0174 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{4 \cdot 1,01737}{\pi \cdot 0,018^2 \cdot 3600} = 1,1106 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{4 \cdot 1,0174}{\pi \cdot 0,0129^2 \cdot 3600} = 2,1623 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\Delta h_{id} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{2,16226^2 - 1,11056^2}{2 \cdot 9,81} = 0,175 \text{ m}$$

$$\Delta h_{zz} = \Delta h + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} = 0,220 + \frac{1,1106^2 - 2,1623^2}{2 \cdot 9,81} = 0,045 \text{ m}$$

Rozšíření průřezu $d = 12,9 \text{ mm} \rightarrow d = 18 \text{ mm}$

Δh_c	Q	$\Delta h (h_1-h_2)$	v_1	v_2	Δh_{id}	Δh_{zR}
[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[mm]
221	1,0174	-119	2,1623	1,1106	-175	56
210	0,9941	-114	2,1128	1,0852	-168	54
196	0,9635	-108	2,0478	1,0518	-157	49
176	0,9177	-99	1,9504	1,0017	-143	44
143	0,8353	-80	1,7753	0,9118	-118	38
111	0,7447	-62	1,5828	0,8129	-94	32
90	0,6772	-52	1,4394	0,7393	-78	26
76	0,6273	-45	1,3332	0,6848	-67	22
52	0,5282	-32	1,1227	0,5766	-47	15
44	0,4897	-28	1,0408	0,5346	-41	13
24	0,3721	-15	0,7909	0,4062	-23	8
9	0,2386	-7	0,5072	0,2605	-10	3

Celý úsek, rovný úsek

Δh_{clona}	Q	$\Delta h (h_1-h_4)$	$\Delta h (h_2-h_3)$	$\Delta h (h_1-h_2+h_3-h_4)$
[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[mm]	[mm]
217	1,0090	213	113	100
210	0,9941	207	108	99
195	0,9613	191	100	91
179	0,9247	176	92	84
148	0,8484	148	80	68
113	0,7508	113	63	50
91	0,6806	92	52	40
78	0,6347	80	44	36
56	0,5463	59	32	27
41	0,4743	43	25	18
22	0,3578	26	17	9
10	0,2503	12	10	2

Příloha 2. Difuzor – naměřené a vypočtené hodnoty

Difuzor - úhel rozšíření 30°

Δh_c	Q	v_1	v_2	Δh_{id}	Re_1	Re_2	$\Delta h (h_1-h_2)$	Δh_z	ζ_1	ζ_2	$\bar{\delta}_M$
[mm]	[m.h ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[1]	[1]	[mm]	[mm]	[1]	[1]	%
170	0,9034	2,2187	0,6601	-229	28430	15508	-120	109	0,4332	4,8941	0,920
166	0,8937	2,1949	0,6530	-224	28125	15341	-119	105	0,4269	4,8223	0,954
162	0,8839	2,1708	0,6459	-219	27816	15173	-118	101	0,4202	4,7470	0,991
159	0,8764	2,1525	0,6404	-215	27582	15045	-115	100	0,4245	4,7957	0,998
147	0,8458	2,0773	0,6181	-200	26619	14519	-107	93	0,4250	4,8013	1,070
136	0,8165	2,0054	0,5967	-187	25697	14017	-98	89	0,4334	4,8960	1,126
119	0,7686	1,8877	0,5616	-166	24189	13194	-85	81	0,4435	5,0101	1,242
90	0,6772	1,6634	0,4949	-129	21314	11626	-65	64	0,4505	5,0898	1,574
61	0,5678	1,3947	0,4149	-90	17871	9748	-45	45	0,4576	5,1692	2,204
39	0,4637	1,1388	0,3388	-60	14593	7960	-28	32	0,4879	5,5120	3,100
21	0,3503	0,8604	0,2560	-34	11024	6013	-17	17	0,4609	5,2066	5,751
10	0,2503	0,6148	0,1829	-18	7878	4297	-8	10	0,4962	5,6054	10,462
4	0,1653	0,4059	0,1208	-8	5201	2837	-3	5	0,5543	6,2616	21,482

Výpočet pro první řádek tabulky:

$$Q = 0,0882 \cdot h_c^{0,453} = 0,0882 \cdot 170^{0,453} = 0,9034 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$v_1 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_1^2} = \frac{4 \cdot 0,9034}{\pi \cdot 0,012^2 \cdot 3600} = 2,2187 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_2^2} = \frac{4 \cdot 0,9034}{\pi \cdot 0,022^2 \cdot 3600} = 0,6601 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta h_{id} = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2 \cdot g} = \frac{0,6601^2 - 2,2187^2}{2 \cdot 9,81} = 0,2287 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} \nu &= 3 \cdot 10^{-8} t^4 - 9 \cdot 10^{-6} t^3 + 0,001 t^2 - 0,0552 t + 1,7782 = \\ &= 3 \cdot 10^{-8} \cdot 23^4 - 9 \cdot 10^{-6} \cdot 23^3 + 0,001 \cdot 23^2 - 0,0552 \cdot 23 + 1,7782 = \\ &= 9,3649 \cdot 10^{-7} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

$$Re_1 = \frac{v_1 \cdot d_1}{\nu} = \frac{2,2187 \cdot 0,012}{9,3649 \cdot 10^{-7}} = 28430$$

$$Re_2 = \frac{v_2 \cdot d_2}{\nu} = \frac{0,6601 \cdot 0,022}{9,3649 \cdot 10^{-7}} = 15508$$

$$\Delta h_z = \Delta h + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2 \cdot g} = (-0,120) + \frac{2,2187^2 - 0,6601^2}{2 \cdot 9,81} = 0,109 \text{ m}$$

$$\zeta_1 = \frac{h_z \cdot 2 \cdot g}{v_1^2} = \frac{0,1087 \cdot 2 \cdot 9,81}{2,2187^2} = 0,4332$$

$$\zeta_2 = \frac{h_z \cdot 2 \cdot g}{v_2^2} = \frac{0,1087 \cdot 2 \cdot 9,81}{0,6601^2} = 4,8941$$

$$\delta_M = \frac{|\Delta_m|}{X} \cdot 100 = \frac{0,001 \cdot 100}{0,1087} = 0,920 \%$$

Difuzor - úhel rozšíření 60°

Δh_c	Q	v_1	v_2	Δh_{id}	Re1	Re2	$\Delta h (h_1-h_2)$	Δh_z	ζ_1	ζ_2	$\bar{\delta}_M$
[mm]	[m.h ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[1]	[1]	[mm]	[mm]	[1]	[1]	%
170	0,9034	2,2187	0,6601	-229	28430	15508	-48	181	0,7202	8,1359	0,553
166	0,8937	2,1949	0,6530	-224	28125	15341	-46	178	0,7241	8,1808	0,562
162	0,8839	2,1708	0,6459	-219	27816	15173	-43	176	0,7325	8,2746	0,568
159	0,8764	2,1525	0,6404	-215	27582	15045	-45	170	0,7209	8,1444	0,587
147	0,8458	2,0773	0,6181	-200	26619	14519	-40	160	0,7296	8,2426	0,623
136	0,8165	2,0054	0,5967	-187	25697	14017	-37	150	0,7310	8,2579	0,667
119	0,7686	1,8877	0,5616	-166	24189	13194	-30	136	0,7463	8,4311	0,738
90	0,6772	1,6634	0,4949	-129	21314	11626	-24	105	0,7413	8,3744	0,957
61	0,5678	1,3947	0,4149	-90	17871	9748	-16	74	0,7501	8,4738	1,345
39	0,4637	1,1388	0,3388	-60	14593	7960	-12	48	0,7300	8,2463	2,072
21	0,3503	0,8604	0,2560	-34	11024	6013	-8	26	0,6994	7,9016	3,790
10	0,2503	0,6148	0,1829	-18	7878	4297	-4	14	0,7038	7,9512	7,376
4	0,1653	0,4059	0,1208	-8	5201	2837	-2	6	0,6733	7,6068	17,684

Difuzor - úhel rozšíření 90°

Δh_c	Q	v_1	v_2	Δh_{id}	Re1	Re2	$\Delta h (h_1-h_2)$	Δh_z	ζ_1	ζ_2	$\bar{\delta}_M$
[mm]	[m.h ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[1]	[1]	[mm]	[mm]	[1]	[1]	%
170	0,9034	2,2187	0,6601	-229	28430	15508	-25	204	0,8118	9,1715	0,491
166	0,8937	2,1949	0,6530	-224	28125	15341	-22	202	0,8219	9,2849	0,495
162	0,8839	2,1708	0,6459	-219	27816	15173	-26	193	0,8032	9,0742	0,518
159	0,8764	2,1525	0,6404	-215	27582	15045	-25	190	0,8056	9,1011	0,526
147	0,8458	2,0773	0,6181	-200	26619	14519	-22	178	0,8115	9,1671	0,560
136	0,8165	2,0054	0,5967	-187	25697	14017	-21	166	0,8090	9,1397	0,603
119	0,7686	1,8877	0,5616	-166	24189	13194	-20	146	0,8014	9,0531	0,687
90	0,6772	1,6634	0,4949	-129	21314	11626	-15	114	0,8051	9,0954	0,881
61	0,5678	1,3947	0,4149	-90	17871	9748	-11	79	0,8005	9,0436	1,260
39	0,4637	1,1388	0,3388	-60	14593	7960	-8	52	0,7905	8,9299	1,914
21	0,3503	0,8604	0,2560	-34	11024	6013	-4	30	0,8055	9,0993	3,291
10	0,2503	0,6148	0,1829	-18	7878	4297	-2	16	0,8077	9,1242	6,428
4	0,1653	0,4059	0,1208	-8	5201	2837	-1	7	0,7924	8,9519	15,026

Příloha 3. Konfuzor – naměřené a vypočtené hodnoty

Konfuzor - úhel zúžení 30°

Δh_c	Q	v_1	v_2	Δh_{id}	Re1	Re2	$\Delta h (h_1-h_2)$	Δh_z	ζ_1	ζ_2	\bar{o}_M
[mm]	[m.h ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[1]	[1]	[mm]	[mm]	[1]	[1]	%
194	0,95905	0,7008	2,3555	258	16464	30183	288	30	1,2078	0,1069	3,307
183	0,93403	0,6825	2,2941	244	16034	29396	274	30	1,2430	0,1100	3,388
175	0,9153	0,6688	2,2481	235	15713	28806	263	28	1,2375	0,1095	3,544
168	0,89853	0,6566	2,2069	226	15425	28278	253	27	1,2170	0,1077	3,740
160	0,87889	0,6422	2,1586	216	15087	27660	243	27	1,2617	0,1117	3,770
153	0,86126	0,6294	2,1153	208	14785	27105	232	24	1,1949	0,1058	4,145
137	0,81922	0,5986	2,0121	188	14063	25783	211	23	1,2548	0,1111	4,363
128	0,79439	0,5805	1,9511	177	13637	25001	198	21	1,2314	0,1090	4,728
111	0,74473	0,5442	1,8291	155	12784	23438	174	19	1,2301	0,1089	5,385
86	0,66343	0,4848	1,6295	123	11389	20879	138	15	1,2232	0,1083	6,825
54	0,53733	0,3926	1,3197	81	9224,1	16911	90	9	1,1562	0,1023	11,006
39	0,46368	0,3388	1,1388	60	7959,8	14593	67	7	1,1530	0,1021	14,822
33	0,42989	0,3141	1,0558	52	7379,7	13529	58	6	1,2346	0,1093	16,104
19	0,33477	0,2446	0,8222	31	5746,8	10536	36	5	1,5058	0,1333	21,772
7	0,21296	0,1556	0,5230	13	3655,8	6702,2	14	1	1,0454	0,0925	77,501
3	0,14508	0,1060	0,3563	6	2490,5	4565,9	8	2	3,6684	0,3247	47,587

Konfuzor - úhel zúžení 60°

Δh_c	Q	v_1	v_2	Δh_{id}	Re1	Re2	$\Delta h (h_1-h_2)$	Δh_z	ζ_1	ζ_2	\bar{o}_M
[mm]	[m.h ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[1]	[1]	[mm]	[mm]	[1]	[1]	%
195	0,96129	0,7025	2,3610	259	16502	30254	300	41	1,6315	0,1444	2,437
182	0,93171	0,6808	2,2884	243	15994	29323	281	38	1,5967	0,1413	2,651
165	0,89123	0,6513	2,1889	223	15299	28049	257	34	1,5915	0,1409	2,907
152	0,8587	0,6275	2,1091	207	14741	27025	239	32	1,6122	0,1427	3,091
140	0,8273	0,6045	2,0319	192	14202	26037	221	29	1,5671	0,1387	3,426
128	0,79439	0,5805	1,9511	177	13637	25001	203	26	1,5225	0,1348	3,824
111	0,74473	0,5442	1,8291	155	12784	23438	178	23	1,4951	0,1323	4,431
98	0,70387	0,5143	1,7288	139	12083	22152	159	20	1,4948	0,1323	4,961
85	0,65993	0,4822	1,6208	122	11329	20769	140	18	1,5146	0,1341	5,570
70	0,60436	0,4416	1,4844	102	10375	19020	116	14	1,3720	0,1214	7,332
53	0,5328	0,3893	1,3086	80	9146,3	16768	92	12	1,6107	0,1426	8,036
35	0,4415	0,3226	1,0844	55	7579	13895	63	8	1,5784	0,1397	11,942
21	0,35029	0,2560	0,8604	34	6013,3	11024	42	8	2,2793	0,2018	13,137
10	0,2503	0,1829	0,6148	18	4296,8	7877,5	19	1	0,8456	0,0749	69,350
5	0,18285	0,1336	0,4491	9	3138,9	5754,7	12	3	2,8901	0,2558	38,024
3	0,14508	0,1060	0,3563	6	2490,5	4565,9	7	1	1,9227	0,1702	90,793

Konfuzor - úhel zúžení 90°

Δh_c	Q	v_1	v_2	Δh_{id}	Re1	Re2	$\Delta h (h_1-h_2)$	Δh_z	ζ_1	ζ_2	$\bar{\delta}_M$
[mm]	[m.h ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[m.s ⁻¹]	[mm]	[1]	[1]	[mm]	[mm]	[1]	[1]	%
196	0,9635	0,7041	2,3665	260	16540	30324	335	74,8	2,9615	0,2622	1,336
185	0,9386	0,6859	2,3054	247	16113	29541	315	68,1	2,8398	0,2514	1,469
177	0,9200	0,6723	2,2597	237	15794	28955	305	67,8	2,9425	0,2605	1,475
162	0,8839	0,6459	2,1708	219	15173	27816	280	61,1	2,8726	0,2543	1,637
150	0,8536	0,6237	2,0964	204	14653	26863	262	57,8	2,9159	0,2581	1,730
138	0,8219	0,6006	2,0187	189	14110	25868	243	53,7	2,9193	0,2584	1,863
125	0,7859	0,5743	1,9303	173	13491	24734	220	46,9	2,7905	0,2470	2,132
100	0,7103	0,5191	1,7447	141	12194	22356	182	40,6	2,9558	0,2616	2,464
66	0,5885	0,4300	1,4453	97	10102	18520	127	30	3,1781	0,2813	3,339
40	0,4690	0,3427	1,1520	62	8051,6	14761	80	18,3	3,0646	0,2713	5,450
25	0,3791	0,2770	0,9311	40	6507,5	11930	55	14,7	3,7656	0,3333	6,790
15	0,3008	0,2198	0,7387	25	5163,2	9465,9	30	4,65	1,8878	0,1671	21,515
8	0,2262	0,1653	0,5557	14	3883,7	7120,2	20	5,66	4,0601	0,3594	17,681
3	0,1451	0,1060	0,3563	6	2490,5	4565,9	7	1,1	1,9227	0,1702	90,793

Příloha 4. Smyčky – naměřené a vypočtené hodnoty

Smyčka d=14,4mm

Δh_c	Q	$\Delta h_z (h_1-h_2)$	v	e_{zc}	Re	e_{zt}	λ	e_{zv}	(e_{zv}/e_{zc})	δ_M
[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[J.kg ⁻¹]	[1]	[J.kg ⁻¹]	[1]	[J.kg ⁻¹]	%	%
175	0,9153	470	1,5612	4,611	24005	2,235	0,0254	2,376	51,53	0,213
165	0,8912	450	1,5201	4,415	23374	2,133	0,0256	2,281	51,68	0,222
154	0,8638	425	1,4733	4,169	22655	2,020	0,0258	2,150	51,56	0,235
143	0,8353	395	1,4247	3,875	21907	1,904	0,0260	1,971	50,85	0,253
120	0,7715	340	1,3159	3,335	20234	1,657	0,0265	1,678	50,31	0,294
90	0,6772	260	1,1551	2,551	17762	1,319	0,0274	1,231	48,28	0,385
56	0,5463	171	0,9317	1,678	14326	0,906	0,0289	0,772	46,01	0,585
37	0,4528	118	0,7722	1,158	11874	0,652	0,0303	0,505	43,67	0,847
22	0,3578	78	0,6102	0,765	9383	0,432	0,0321	0,333	43,56	1,282
15	0,3008	57	0,5130	0,559	7888	0,319	0,0336	0,240	43,00	1,754
8	0,2262	34	0,3859	0,334	5933	0,194	0,0361	0,140	41,94	2,941
4	0,1653	19	0,2819	0,186	4335	0,112	0,0390	0,075	40,03	5,263
3	0,1451	15	0,2474	0,147	3805	0,089	0,0403	0,058	39,52	6,667

Výpočet pro první řádek tabulky:

$$Q = 0,0882 \cdot h_c^{0,453} = 0,0882 \cdot 175^{0,453} = 0,9153 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$v = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,9153}{\pi \cdot 0,0144^2 \cdot 3600} = 1,5612 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{Re} = \frac{v \cdot d}{\nu} = \frac{1,5612 \cdot 0,0144}{9,3649 \text{E} - 07} = 24005$$

$$e_{zc} = \Delta h_z \cdot g = 0,470 \cdot 9,81 = 4,611 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\lambda = 0,3164 \cdot \text{Re}^{-0,25} = 0,3164 \cdot 24005^{-0,25} = 0,0254$$

$$e_{zt} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2} = 0,0254 \cdot \frac{1,056}{0,0144} \cdot \frac{1,5612^2}{2} = 2,235 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$e_{zv} = e_{zc} - e_{zt} = 4,611 - 2,235 = 2,376 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\frac{e_{zv}}{e_{zc}} \cdot 100 = \frac{2,235}{4,611} \cdot 100 = 51,53 \%$$

$$\delta_M = \frac{|\Delta_m|}{X} \cdot 100 = \frac{0,001 \cdot 100}{0,470} = 0,213 \%$$

Smyčka d=18mm

Δh_c	Q	$\Delta h_z (h_1-h_2)$	v	e_{zc}	Re	e_{zT}	λ	e_{zv}	(e_{zv}/e_{zc})	δ_M
[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[J.kg ⁻¹]	[1]	[J.kg ⁻¹]	[1]	[J.kg ⁻¹]	%	%
218	1,0111	271	1,1037	2,659	21214	0,927	0,0262	1,731	65,13	0,369
203	0,979	258	1,0686	2,531	20540	0,876	0,0264	1,655	65,38	0,388
188	0,9455	237	1,0321	2,325	19838	0,824	0,0267	1,501	64,54	0,422
163	0,8863	213	0,9675	2,090	18596	0,736	0,0271	1,353	64,77	0,469
143	0,8353	188	0,9118	1,844	17525	0,664	0,0275	1,181	64,02	0,532
124	0,783	165	0,8548	1,619	16429	0,593	0,0279	1,026	63,38	0,606
101	0,7136	138	0,7789	1,354	14971	0,504	0,0286	0,850	62,79	0,725
76	0,6273	110	0,6848	1,079	13162	0,402	0,0295	0,677	62,74	0,909
52	0,5282	77	0,5766	0,755	11083	0,298	0,0308	0,458	60,60	1,299
35	0,4415	54	0,4819	0,530	9263	0,217	0,0323	0,312	58,95	1,852
24	0,3721	40	0,4062	0,392	7808	0,161	0,0337	0,231	58,91	2,500
9	0,2386	19	0,2605	0,186	5007	0,074	0,0376	0,112	60,25	5,263
2	0,1207	5	0,1318	0,049	2533	0,022	0,0446	0,027	54,16	20,00

Smyčka d=23,3mm

Δh_c	Q	$\Delta h_z (h_1-h_2)$	v	e_{zc}	Re	e_{zT}	λ	e_{zv}	(e_{zv}/e_{zc})	δ_M
[mm]	[m ³ .h ⁻¹]	[mm]	[m.s ⁻¹]	[J.kg ⁻¹]	[1]	[J.kg ⁻¹]	[1]	[J.kg ⁻¹]	%	%
205	0,9833	89	0,6406	0,873	15938	0,262	0,0282	0,611	70,01	1,124
188	0,9455	83	0,6160	0,814	15325	0,244	0,0284	0,570	69,97	1,205
165	0,8912	72	0,5806	0,706	14446	0,220	0,0289	0,486	68,79	1,389
128	0,7944	58	0,5175	0,569	12876	0,180	0,0297	0,389	68,32	1,724
98	0,7039	45	0,4586	0,441	11409	0,146	0,0306	0,296	66,96	2,222
81	0,6457	38	0,4206	0,373	10465	0,125	0,0313	0,247	66,35	2,632
58	0,5550	28	0,3616	0,275	8996	0,096	0,0325	0,178	64,96	3,571
25	0,3791	14	0,2470	0,137	6144	0,049	0,0357	0,088	64,04	7,143
11	0,2613	8	0,1703	0,078	4236	0,026	0,0392	0,053	67,17	12,50
4	0,1653	5	0,1077	0,049	2679	0,012	0,0440	0,037	76,44	20,00
2	0,1207	3	0,0787	0,029	1957	0,007	0,0476	0,023	77,34	33,33